



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR
LINEAL DE INDUCCIÓN
LINEAR INDUCTION MOTOR
(L.I.M.)**

Autor: CARLOS PÉREZ RODRIGUEZ

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Director: Dr. D. JAVIER JOSÉ MARÍA RIVAS CONDE

Tutor: Dr. D. GUILLERMO ROBLES MUÑOZ

Leganés, Junio de 2011



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Título: CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN.
LINEAR INDUCTION MOTOR (LIM)

Autor: Carlos Pérez Rodríguez

Director: Dr. D. Javier José María Rivas Conde

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)



Agradecimientos

En primer lugar dedicar el esfuerzo realizado durante los años de carrera a mis padres, D. Estanislao Pérez Torralbo y Dña. Lorenza Rodríguez Serrano, por confiar siempre en mí y porque gracias a ellos ha sido posible llegar hasta aquí, sin olvidarme de que su ejemplo de dedicación y esfuerzo han resultado una referencia en mi vida.

También quiero acordarme del resto de mi familia, ya que siempre me han mostrado su apoyo, entre todos ellos quiero destacar a mi hermana Xaqueline, a mi abuela Felicitas, a mis tíos Jesús y Natividad, a mi tío Migue y a mi primo Olmo.

Deseo agradecer de un modo especial a mi novia Beatriz, por la paciencia mostrada, por su apoyo y por comprender cuál era mi prioridad.

No quisiera olvidarme de mis compañeros Juan Antonio y Daniel, con los que he compartido muchos momentos duros y a los que me une una gran amistad.

Tampoco quiero olvidarme de todos aquellos profesores y compañeros que me han ayudado a aprender.

Aprovecho para agradecer a mis amigos y a todas las personas que me han sacado una sonrisa, porque con ello me han motivado a continuar.

A todos ellos, GRACIAS.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)



Resumen

Se parte de un prototipo ya construido, del que se desconocen sus características eléctricas y magnéticas, y por lo tanto se desconoce su funcionamiento, por lo que el trabajo ha consistido en la definición del funcionamiento nominal del motor lineal de inducción, mediante el estudio de la inducción magnética presente en el entrehierro y de la curva característica empuje – velocidad. Se disponía del primario de la máquina (armadura), pero no se disponía del secundario (jaula de ardilla).

Palabras clave:

LIM

Empuje

Flux



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)



Abstract

The starting point is an already built prototype. Its electrical and magnetic characteristics are unknown; therefore its performance is unknown. So, the work involves the definition of the linear induction motor nominal operation. It is carried out by the study of the magnetic induction of the air gap and the speed-thrust characteristic curve. It was provided the primary of the machine (armature), but the secondary was not provided (squirrel-cage).

Keywords:

LIM

Thrust

Flux



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Índice general

Agradecimientos	5
Resumen.....	7
Abstract	9
Índice general	10
Índice de figuras	13
Índice de tablas.....	15
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	16
1.1 Introducción	16
1.2 Objetivos	17
1.3 Fases del desarrollo.....	17
1.4 Medios empleados	17
1.5 Estructura de la memoria.....	17
2 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS MOTORES LINEALES ASÍNCRONOS.....	19
2.1 Introducción	19
2.2 La máquina asíncrona.	19
2.2.1 El sistema eléctrico de potencia.....	19
2.2.2 Clasificación de las máquinas asíncronas.....	21
2.2.3 Partes constitutivas y su función.....	21
2.2.4 Modos de funcionamiento	22
2.3 Motor de inducción lineal. Definición.....	23
2.3.1 Aplicaciones.....	23
2.4 Conceptos electromagnéticos.....	25
2.4.1 Ley de Ampère	25
2.4.2 Ley de Faraday.....	26
2.4.3 Fuerza de Lorentz	26
2.4.4 Ley de Biot-Savart.....	26
3 MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELO	27
3.1.1 Materiales empleados en la armadura	27
3.1.2 Materiales empleados en la jaula de ardilla	30
4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	31



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

4.1.1	Dimensiones del modelo	31
4.1.2	Método de análisis: Teoría de elementos finitos	32
4.1.3	Software empleado. Flux. Versión 10.3	33
5	ANÁLISIS DE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA PRESENTE EN LA MÁQUINA.....	35
5.1	Objetivo	35
5.2	Configuración del devanado	35
5.3	Configuración de corrientes de la armadura	36
5.3.1	Teorema de Ferraris generalizado para una máquina lineal	37
5.3.2	Sistema trifásico directo de corrientes	37
5.3.3	Velocidad de sincronismo	39
5.3.4	Concepto de sincronismo.....	40
5.4	Análisis de la inducción magnética presente en el entrehierro.....	40
6	ESTUDIO ESTÁTICO DE UN MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN	41
6.1	Estudio estático lineal	42
6.1.1	Distribución de fases en el devanado de la armadura	42
6.1.2	Variación de parámetros para la obtención de valores máximos de inducción magnética adecuados en el entrehierro	44
6.1.3	Efecto de borde	51
6.2	Estudio estático no lineal	54
7	ESTUDIO DINÁMICO DE UN MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN.....	56
7.1	Curva empuje - deslizamiento.....	57
7.1.1	Variación de la resistencia de las barras de la jaula de ardilla	57
7.1.2	Régimen nominal	65
7.1.3	Barras de la jaula de ardilla de cobre	69
7.2	Empuje nominal	73
8	PRESUPUESTO DEL PROYECTO	76
8.1	Introducción	76
8.2	Descripción del proyecto.....	76
8.3	Fases del proyecto.....	77
8.4	Costes del proyecto.....	78
8.4.1	Costes de personal	78
8.4.2	Costes del material.....	78
8.4.3	Costes de subcontratación de tareas	79



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

8.4.4	Otros costes directos del proyecto	79
8.4.5	Resumen de costes.....	80
9	CONCLUSIONES DEL PROYECTO.....	81
9.1	Conclusiones técnicas	81
9.2	Conclusiones personales	81
10	BIBLIOGRAFÍA.....	82

Índice de figuras

Figura 1-1: Planta de la armadura con el conexionado de las bobinas.....	16
Figura 1-2: Perfil de la armadura con las cabezas de bobina en primer plano	16
Figura 3-1: Curva B-H del Fe sin saturación	28
Figura 3-2: Curva B-H del Fe con saturación	29
Figura 3-3: Ciclo de histéresis correspondiente al material ferromagnético.....	30
Figura 4-1: Dimensiones del motor lineal asíncrono	31
Figura 5-1: Topología del devanado: paso acortado.....	35
Figura 5-2: Distribución de fases por colores en la armadura	35
Figura 5-3: Dimensiones de la ranura de la bobina.....	36
Figura 5-4: Esquema del circuito eléctrico de la armadura o estator	36
Figura 5-5: Sistema trifásico directo de corrientes	38
Figura 6-1: Situación del entrehierro mecánico y magnético	41
Figura 6-2: Errónea distribución de fases en el devanado de la armadura	42
Figura 6-3: Inducción magnética de la errónea distribución de fases en el devanado de la armadura.....	42
Figura 6-4: Auténtica distribución de fases en el devanado de la armadura.....	43
Figura 6-5: Inducción magnética de la auténtica distribución de fases en el devanado de la armadura.....	43
Figura 6-6: Inducción magnética para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 3 A/mm ²	45
Figura 6-7: Inducción magnética para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 6 A/mm ²	46
Figura 6-8: Inducción magnética para una altura del entrehierro mecánico de 3 mm	47
Figura 6-9: Inducción magnética para un espesor de las barras de la jaula de ardilla 1mm	48
Figura 6-10: Inducción magnética para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 10 A/mm ²	49
Figura 6-11: Distribución de fases en el devanado de nuestro motor lineal asíncrono	51
Figura 6-12: Inducción magnética del motor lineal asíncrono.....	51
Figura 6-13: Distribución de fases en el devanado después de eliminar el devanado de cada extremo	52
Figura 6-14: Inducción magnética después de eliminar el devanado de cada extremo.....	52
Figura 6-15: Distribución de fases en el devanado después de eliminar los 2 devanados de cada extremo	53
Figura 6-16: Inducción magnética después de eliminar los 2 devanados de cada extremo.....	53
Figura 6-17: Inducción magnética para un material de saturación de 1,2 T.....	54
Figura 6-18: Inducción magnética para un material de saturación de 1,7 T.....	55
Figura 7-1: Esquema circuito eléctrico utilizado en Flux.....	56
Figura 7-2: Dimensiones de una barra de la jaula de ardilla	57
Figura 7-3: Curva empuje – deslizamiento para una R _{barras} de 1,24E-05 Ω	60
Figura 7-4: Curva empuje – deslizamiento para una R _{barras} de 4,40E-05 Ω	62
Figura 7-5: Curva empuje – deslizamiento para una R _{barras} de 7,06E-05 Ω	64



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Figura 7-6: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$	67
Figura 7-7: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$	68
Figura 7-8: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor en las barras de 3,48 mm.....	71
Figura 7-9: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor en las barras de 3,48 mm	72
Figura 7-10: Dimensiones de la ranura de la bobina	73



Índice de tablas

Tabla 3-1: Clasificación de materiales según χ_m	27
Tabla 5-1: Configuración de corrientes aplicadas al motor lineal síncrono.....	37
Tabla 5-2: Densidad de corriente (J) en $w_t = 0^\circ = 0 \text{ rad}$	38
Tabla 5-3: Densidad de corriente (J) en $w_t = 120^\circ = 2 \cdot \pi/3 \text{ rad}$	38
Tabla 5-4: Densidad de corriente (J) en $w_t = 240^\circ = 4 \cdot \pi/3 \text{ rad}$	38
Tabla 6-1: Densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 3 A/mm^2	44
Tabla 6-2: Densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 6 A/mm^2	45
Tabla 6-3: Variación altura entrehierro mecánico.....	46
Tabla 6-4: Variación espesor barras jaula de ardilla.....	47
Tabla 6-5: Densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 10 A/mm^2	49
Tabla 7-1: Variación de la resistencia de las barras al variar la resistividad del material del que están construidas.....	58
Tabla 7-2: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,24\text{E-}05 \Omega$	59
Tabla 7-3: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $4,40\text{E-}05 \Omega$	61
Tabla 7-4: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $7,06\text{E-}05 \Omega$	63
Tabla 7-5: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$	66
Tabla 7-6: Valores de velocidad y empuje nominales para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8%.....	68
Tabla 7-7: Empuje en función del deslizamiento para una $R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor en las barras de $3,48 \text{ mm}$	70
Tabla 7-8: Valores de velocidad y empuje nominales para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8% para un espesor de barras de $3,48 \text{ mm}$	72
Tabla 7-9: Valores de corriente máxima eficaz medidos en las tres resistencias de los devanados para una $R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de $3,48 \text{ mm}$	74
Tabla 7-10: Valores régimen nominal para una $R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de $3,48 \text{ mm}$	75
Tabla 7-11: Fase de las corrientes que circulan por las tres resistencias de los devanados de la armadura.....	75
Tabla 8-1: Diagrama de Gantt.....	77
Tabla 8-2: costes de personal.....	78
Tabla 8-3: Costes de material.....	78
Tabla 8-4: Costes de subcontratación de tareas.....	79
Tabla 8-5: Costes de alquiler de licencia Flux.....	79
Tabla 8-6: Resumen de costes.....	80

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Se disponía de la armadura de un prototipo de un motor lineal, que en un principio es común para motores de inducción y síncronos. Se utiliza esta armadura para indicar las características de funcionamiento, ya que no se disponía de las características para las que se había utilizado.

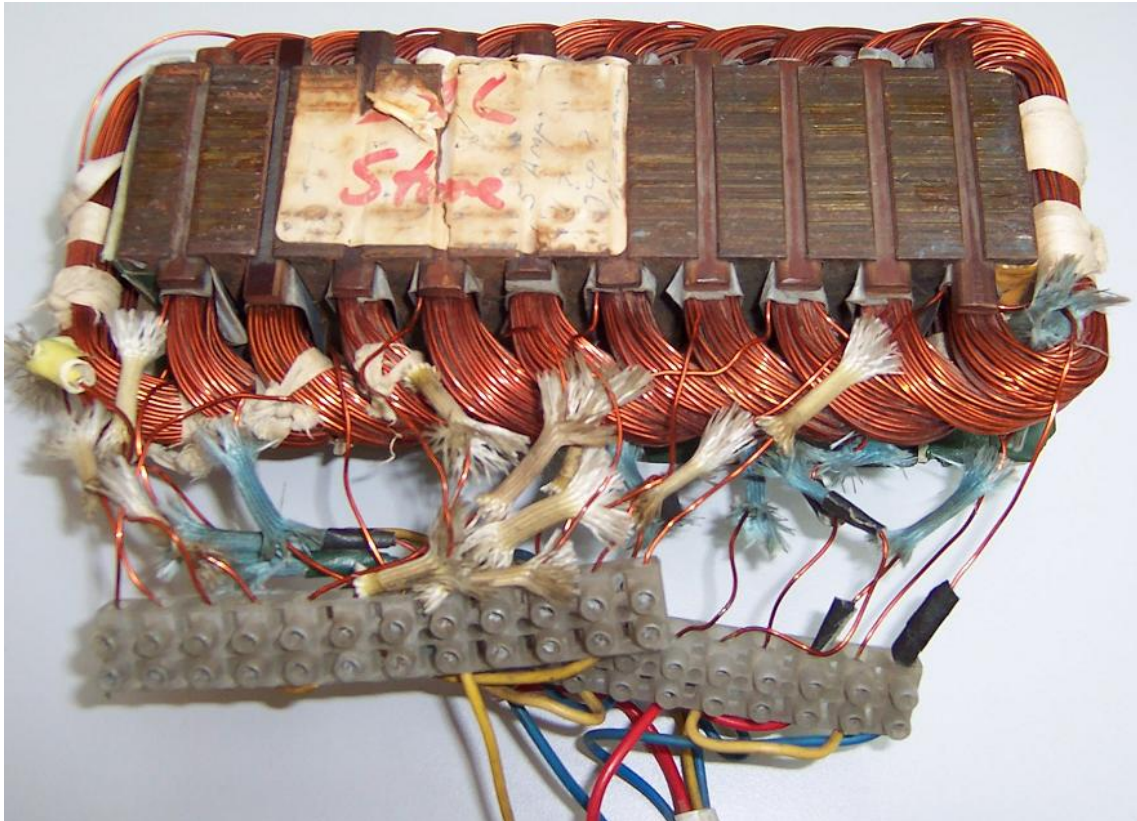


Figura 1-1: Planta de la armadura con el conexionado de las bobinas

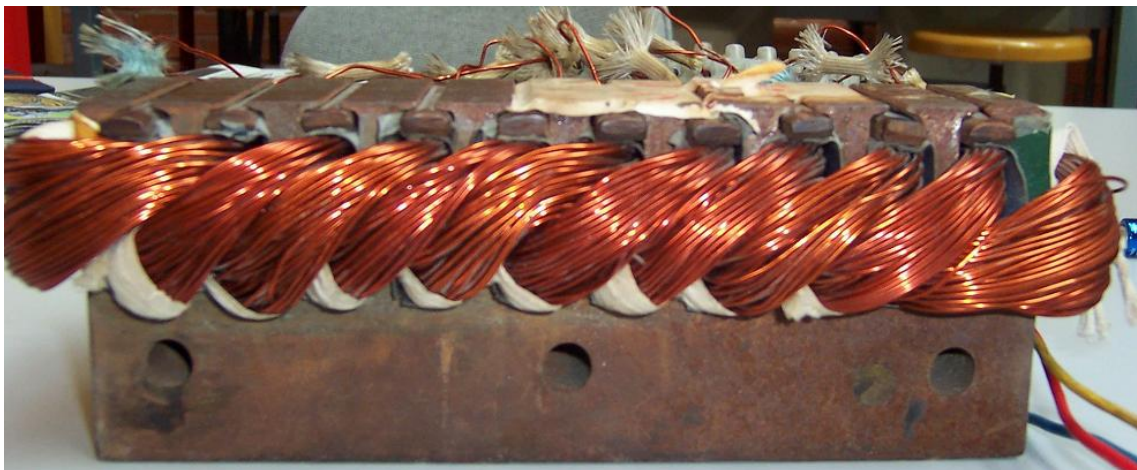


Figura 1-2: Perfil de la armadura con las cabezas de bobina en primer plano



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

1.2 Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es hacer una aplicación de motor lineal de inducción de jaula de ardilla con el software facilitado para su análisis (Flux. Versión 10.3). En base a ese objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Conseguir un buen funcionamiento para un régimen nominal determinado (conocimiento de las características de funcionamiento de régimen nominal, corrientes nominales, empuje nominal, empuje máximo y empuje en el arranque).
- Realizar un estudio estático lineal y no lineal del modelo, analizando la respuesta del campo magnético presente en la máquina para obtener valores apropiados de inducción magnética en el entrehierro.
- Realizar un estudio dinámico del modelo, analizando la curva empuje – deslizamiento, para conseguir un funcionamiento como motor y que su régimen nominal esté entre los márgenes que se consideran adecuados.

1.3 Fases del desarrollo

Conocimiento exhaustivo del software Flux.

Profundización y repaso de la teoría de máquinas eléctricas aplicadas al diseño, ya que el autor del proyecto es de la especialidad de electrónica y no de electricidad.

1.4 Medios empleados

Software del método de elementos finitos (MEF): Flux. Versión 10.3.

1.5 Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

Aspectos fundamentales de los motores lineales asíncronos.

Se hace un repaso de la teoría de máquinas eléctricas. Definiciones, conceptos asociados a su análisis, clasificación, las partes que la componen y su función, aplicaciones y conceptos electromagnéticos.

Materiales empleados en el modelo.

Se describen los materiales empleados en el motor lineal de inducción y sus características.

Construcción del modelo.

Se definen las dimensiones del modelo del motor lineal de inducción utilizado en el proyecto y se describe el software empleado para analizarlo (Flux. Versión 10.3).

Análisis de la inducción magnética presente en la máquina.

Se analiza la configuración de las corrientes de la armadura y se analizan qué valores de inducción magnética presente en el entrehierro se pueden considerar correctos.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Estudio estático de un motor lineal de inducción.

Se realiza un estudio estático lineal del modelo, en el que se varían distintos parámetros de la máquina, con el objetivo de conseguir valores adecuados de inducción magnética en el entrehierro.

También se realiza un estudio estático no lineal, en el que se comparan los valores de inducción magnética para materiales con distinto punto de saturación.

Estudio dinámico de un motor lineal de inducción.

Se realiza un estudio dinámico, con el objetivo de conseguir que el modelo funcione como motor y que su régimen nominal esté entre unos márgenes que se consideran adecuados. Para ello, se analiza la curva empuje – deslizamiento obtenida para distintos valores de resistencia de las barras de la jaula de ardilla. Se obtienen las características de funcionamiento de régimen nominal, corrientes nominales, empuje nominal, empuje máximo y empuje en el arranque.

Presupuesto del proyecto.

Se presenta el presupuesto del proyecto, donde se incluye la descripción, las fases en las que se ha desarrollado y el desglose de los costes que ha supuesto.

Conclusiones del proyecto.

Se exponen las conclusiones técnicas y personales a las que llega el autor al finalizar el proyecto.



2 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS MOTORES LINEALES ASÍNCRONOS

2.1 Introducción

Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. En base a este punto de vista energético, cuando este dispositivo es utilizado para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, se denomina **generador**; cuando convierte la energía eléctrica en mecánica, se llama **motor**. [1]

En términos generales, se puede decir que una máquina eléctrica en general rotativa, se compone de dos partes:

1. Parte fija: Se denomina estator y si el motor es rotativo tiene forma cilíndrica.
2. Parte móvil: si el motor es rotativo se ubica en la cavidad del estator y se denomina rotor que, como su nombre indica, es la parte giratoria de la máquina.

El espacio de aire que separa el estator del rotor, necesario para que pueda existir el movimiento, se denomina entrehierro. [2]

2.2 La máquina asíncrona.

Para una mayor simplicidad, esta exposición se va a referir siempre en principio a la máquina rotativa. Luego se hará la extrapolación a la máquina lineal.

Las máquinas de corriente alterna de tipo asíncrono se caracterizan por el hecho de que la velocidad de giro de su rotor es siempre distinta de la velocidad síncrona. Esto quiere decir que, sea cual sea su modo de funcionamiento, nunca pueden desarrollar la velocidad síncrona. [3]

Este tipo de máquinas recibe también el nombre de “máquinas de inducción”. Esta denominación se debe al hecho de que, a diferencia de otros tipos de máquinas (como, por ejemplo, las síncronas), no es necesario un sistema de excitación externo (ya que esta corriente se genera como consecuencia de la f.e.m. inducida por la acción del inductor sobre el inducido). [3]

2.2.1 El sistema eléctrico de potencia

A continuación se definen una serie de conceptos asociados al análisis de las máquinas asíncronas o máquinas de inducción.

Frecuencia estatórica (f_1)

Es la frecuencia de la red a la que se conecta el bobinado del estator y, por tanto, la frecuencia de las corrientes que recorren los bobinados del estator. Su valor define, junto al número de pares de polos de la máquina, el valor de la velocidad de sincronismo.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Velocidad de sincronismo (n_s)

Es la velocidad del campo rotativo creado por el inductor. Se calcula mediante una de las siguientes expresiones:

$$n_s = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \text{ siendo:}$$

n_s : velocidad de sincronismo [rpm],

f_1 : frecuencia estatórica [Hz].

p : número de pares de polos.

Velocidad de giro (n)

Es la velocidad desarrollada por el rotor. En las máquinas asíncronas se cumple siempre que:

$$n \neq n_s$$

n : velocidad del rotor [rpm].

Por convenio se asigna signo positivo a la velocidad síncrona. Por esta razón, si el rotor gira en el mismo sentido que el campo rotativo, su velocidad es positiva, y si gira en sentido contrario, su velocidad es negativa. [3]

Deslizamiento (s)

Es la velocidad relativa entre el campo rotativo y la velocidad de giro del rotor, expresada en valor “por unidad” respecto a la velocidad síncrona. Por lo tanto no tiene unidades.

$$s = (n_s - n)/n_s$$

Frecuencia rotórica (f_2)

Es la frecuencia de las tensiones e intensidades que se inducen en los bobinados del rotor. Su valor depende de la velocidad relativa entre el campo rotativo y el rotor,

$$f_2 \cdot 60 = p \cdot (n_s - n)$$

Donde:

n_s : [rpm].

n : [rpm].

f_2 : [Hz].

Por tanto se cumple que:

$$f_2 = p \cdot s \cdot n_s \rightarrow f_2 = s \cdot f_1$$



2.2.2 Clasificación de las máquinas asíncronas

Las máquinas asíncronas pueden clasificarse en función de los siguientes aspectos:

Por el número de fases

El número de fases hace siempre referencia al bobinado del estator, es decir, al número de fases de la red que se conecta a su estator. En función de este aspecto se clasifican en:

- Monofásicas.
- Polifásicas (siendo las máquinas trifásicas las más empleadas)

Por el número de polos

Se clasifican en bipolares, tetrapolares, hexapolares, etc.

El número de polos forma parte de la definición de la velocidad síncrona de la máquina y, por tanto, la elección del tipo debe hacerse en función del campo de velocidades que quieran obtenerse con la máquina asíncrona.

Por el tipo de rotor

En función de las características constructivas de su rotor, las máquinas asíncronas pueden ser:

- De rotor bobinado.
- De jaula de ardilla.

En el caso de rotor bobinado, el circuito eléctrico se construye devanando los conductores sobre las ranuras distribuidas a lo largo de la periferia exterior del cilindro de chapas magnéticas que constituyen el rotor. Por lo general se trata de un circuito trifásico conectado en estrella cuyos terminales están conectados a unos anillos rozantes, aislados entre sí, colocados sobre el eje. Estos anillos permiten que, mediante unas escobillas fijas que hacen contacto sobre ellos, se tenga acceso al circuito rotórico para, por ejemplo, modificar sus características mediante la adición de resistencias.

El circuito eléctrico del tipo jaula de ardilla se construye mediante barras conductoras, que pueden ser de aluminio o de cobre, ubicadas en las ranuras y distribuidas a lo largo de la periferia del paquete magnético que constituye el rotor. Todas las barras se cortocircuitan entre sí por sus extremos mediante dos anillos, uno para cada extremo de las barras. Este tipo de rotor es mucho más robusto que el rotor bobinado pero, sin embargo, presenta el gran inconveniente de no permitir el acceso al circuito eléctrico rotórico y, en consecuencia, imposibilita cualquier tipo de actuación sobre él.

2.2.3 Partes constitutivas y su función

Como todas las máquinas rotativas, las máquinas asíncronas constan fundamentalmente de estator, rotor y entrehierro de separación.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Estator

El bobinado del estator realiza la función de inductor. Con independencia del tipo de rotor que se ubique en su interior, el estator está constituido por un paquete de chapas magnéticas ranuradas en su contorno cilíndrico interior (el más cercano al rotor).

Rotor

El bobinado del rotor es el inducido. Se construye del tipo rotor bobinado o jaula de ardilla.

El rotor bobinado debe ser construido para el mismo número de polos que el estator. En el caso de rotor de jaula de ardilla, la influencia del campo creado por el estator hace que en el rotor surja automáticamente el mismo número de polos que en el estator.

2.2.4 Modos de funcionamiento

Entre otras aplicaciones de la máquina asíncrona, las más interesantes son las correspondientes a motor, generador, transformador y freno.

Motor

Es la aplicación más habitual de la máquina asíncrona. En este modo de funcionamiento el bobinado del estator es conectado a una red eléctrica (monofásica o trifásica según el tipo de motor) y el bobinado del rotor debe estar en cortocircuito.

$$0 < n < n_s \rightarrow 1 > s > 0$$

Generador

Este modo de funcionamiento requiere que el rotor sea arrastrado con velocidad superior a la síncrona.

$$n > n_s \rightarrow s < 0$$

El bobinado del rotor debe estar en cortocircuito. En estas condiciones, el generador asíncrono inyecta potencia activa a la red alterna conectada a su estator, de la que, a su vez, necesita tomar la potencia reactiva necesaria para su magnetización. La adición de condensadores permite mejorar el factor de potencia presentado por el generador frente a la red.

Transformador

Este modo de funcionamiento requiere tener acceso a los circuitos eléctrico del rotor y del estator, por lo que, no es aplicable a las máquinas con rotor de jaula de ardilla.

Para que la máquina funcione como transformador, es necesario que el rotor se encuentre bloqueado, por lo que la velocidad y el deslizamiento son:

$$n = 0 \rightarrow s = 1$$

En estas condiciones, si se conecta un bobinado (normalmente el del estator) a una red eléctrica activa, en el otro bobinado (normalmente el del rotor) se obtiene un sistema de



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

tensiones de valor proporcional (en función del número de espiras de uno y otro) e igual frecuencia. Es decir, los bobinados realizan, respectivamente, las funciones de primario y secundario de un transformador.

Esta aplicación presenta la ventaja de que, en función de la posición en que sea bloqueado el rotor respecto al estator, se puede conseguir cualquier ángulo de desfase entre las tensiones primaria y secundaria. Por esta razón, este modo de funcionamiento se denomina “decalador de fase”. [3]

Freno

En su funcionamiento como freno, el eje de la máquina asíncrona es arrastrado en sentido contrario al seguido por el campo rotativo.

$$n < 0 \rightarrow s > 1$$

En este modo de funcionamiento se genera un par que se opone al par aplicado al eje y, en consecuencia, se produce una acción de “frenado” sobre el eje de la máquina. En este modo de funcionamiento el bobinado del rotor debe estar en cortocircuito y el bobinado del estator conectado a una red eléctrica activa. Esto siempre en la máquina asíncrona.

2.3 Motor de inducción lineal. Definición

Un motor de inducción lineal es un tipo de motor asíncrono, en el que se ha sustituido el movimiento de rotación de la máquina por uno de traslación, lo cual, le confiere unas peculiares características que lo hacen aplicable a una diversidad de casos prácticos. Este motor, se puede considerar que se deriva de la máquina convencional, por desarrollo de la misma al cortarle por una generatriz. [2]

Al aplicar un sistema trifásico de corriente al estator, se produce un campo magnético que se propaga desplazándose a la velocidad de sincronismo por el entrehierro de la máquina, de tal forma que aparecen unas tensiones inducidas en el secundario de la máquina, y si este está en cortocircuito, aparecerán unas corrientes inducidas que reaccionarán con el campo inductor produciendo una fuerza de traslación que obliga a mover el rotor, que en este caso se denominará deslizador.

2.3.1 Aplicaciones

La principal ventaja de los motores lineales radica en que pueden conducir el movimiento sin necesidad de engranajes intermedios, tornillos, ejes inestables, etc. Todo ello proporciona una serie de ventajas:

- Mayores valores de aceleración, lo que muchas veces es más importante que el valor de la velocidad máxima.
- Construcción simple y robusta, sobre todo en el caso de deslizador en forma de jaula, que les hace trabajar, en las circunstancias más adversas, dando un excelente servicio con pequeño mantenimiento.
- Reducción de los costes de mantenimiento y mayor disponibilidad de componentes.
- Reducción de los niveles de ruido y vibración.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Pero el uso de motores lineales también presenta una serie de inconvenientes:

- Necesidad de disipación del calor que se genera, por lo que es necesario disponer de sistemas de refrigeración.
- La ausencia de elementos de transmisión mecánica que amortiguan los cambios de carga repentinos, debido a las inercias mecánicas, representan un filtro de paso bajo para cualquier tipo de perturbación mecánica, hace que esta tarea tenga que realizarla un controlador electrónico, por lo que éste tiene que ser extremadamente rápido para mantener la estabilidad.
- Presencia de fuerzas normales al movimiento de la máquina. Se trata de fuerzas atractivas o repulsivas y son causa de mayores o menores esfuerzos en la estructura, mayores fuerzas de rozamiento en los sistemas de guiado y rodamientos, mayores desgastes, más ruido acústico y posibles vibraciones. En motores rotativos, la disponibilidad de una simetría coaxial implica la anulación de unos con otros.

Se puede decir que más del 80% de los motores eléctricos industriales, tanto rotativos como lineales, emplean motores asíncronos, trabajando con una frecuencia de alimentación constante. Sin embargo, el inconveniente más grave que poseen, proviene de la dificultad de regular su velocidad, de ahí que en la tracción eléctrica cedan su puesto a los motores de corriente continua que los hace más idóneos para este servicio. Aunque ahora, con la electrónica de potencia, esta regulación de velocidad se ha logrado mucho. Con el desarrollo de dispositivos electrónicos como inversores y cicloconvertidores, que permiten obtener una frecuencia variable a partir de la frecuencia constante de la red y con la introducción del microprocesador en la electrónica de potencia, se están realizando grandes cambios, ya que empiezan a extenderse las aplicaciones de los motores asíncronos en los accionamientos eléctricos de velocidad variable. [2]. Como botón de muestra en España, fabricantes del AVE Madrid-Barcelona, como Siemens y Talgo, utilizan motores asíncronos, mientras que Alstom, en el anterior AVE Madrid-Sevilla, utiliza motores síncronos

En régimen de motor, la máquina asíncrona es usada en grúas, ascensores, montacargas, mecanismos de avance de máquinas, cintas transportadoras, mecanismos en los que el par resistente principal sea el de rozamiento, bombas centrífugas, ventiladores, hélices, etc.

En régimen de generador la máquina asíncrona se usa en centrales eólicas donde las velocidades del viento son muy dispares, centrales eléctricas de pequeña potencia (minicentrales) o instalaciones similares (aprovechamientos de cogeneración, etc.).

En régimen de freno la máquina asíncrona se usa en máquinas de elevación y transporte cuando se bajan cargas pesadas. Este tipo de frenado se usa en los trenes de laminación de plantas siderúrgicas y se emplea para conseguir una parada rápida y exacta de muchos mecanismos.



2.4 Conceptos electromagnéticos

Como toda máquina eléctrica, el estudio de los motores lineales asíncronos, obedece a un conjunto de Leyes Electromagnéticas que se resume a continuación:

2.4.1 Ley de Ampère

En la mayoría de las situaciones prácticas que se suelen dar en el estudio de las máquinas eléctricas, el camino elegido para aplicar la ley de Ampère coincide con la trayectoria media seguida por las líneas de campo magnético, por otro lado si el material es homogéneo e isótropo la magnitud del campo magnético es la misma en todo el recorrido:

$$H \cdot l = \mathcal{F} = N \cdot i \quad [2]$$

Siendo:

H : intensidad de campo magnético (medida del “esfuerzo” de una corriente por establecer un campo magnético).

l : longitud magnética media de las líneas de H .

\mathcal{F} : fuerza magnetomotriz.

N : número de espiras.

i : intensidad de corriente.

En los materiales homogéneos e isótropos se cumple la relación modular:

$$B = \mu \cdot H \quad [2]$$

Siendo:

B : inducción magnética.

μ : permeabilidad magnética del material.

Ya que B y H son uniformes y los campos vectoriales correspondientes tienen la misma dirección y sentido. En los materiales ferromagnéticos, μ tiene un valor elevado y no es uniforme, lo que significa que su magnitud depende del módulo de H . Para los demás materiales, sean aislantes o conductores, la permeabilidad es prácticamente la del vacío:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad [2]$$

La permeabilidad de cualquier material se compara con la permeabilidad del vacío

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Siendo:

μ_r : permeabilidad relativa.

μ_0 : permeabilidad en el vacío.



2.4.2 Ley de Faraday

Si un flujo variable atraviesa una espira, se inducirá en ésta una tensión directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo, lo que se expresa mediante la ecuación:

$$e_{ind} = -N \cdot d\Phi/dt$$

Siendo:

e_{ind} : tensión inducida en la bobina.

N : número de vueltas de conductores en la bobina.

Φ : flujo que atraviesa la bobina

2.4.3 Fuerza de Lorentz

Un efecto importante de un campo magnético sobre su entorno es el que ejerce una fuerza sobre un conductor que porta corriente y se encuentra dentro del campo. Si el conductor mide “ l ” metros y porta una corriente de “ i ” amperios. La fuerza sobre el conductor está dada por:

$$\vec{F} = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) = i \cdot l \cdot B \cdot \text{sen} \theta_1$$

Siendo:

i : magnitud de la corriente del conductor.

l : longitud del conductor, con la dirección de “ l ” definida como el sentido de circulación de la corriente.

B : inducción magnética.

θ_1 : ángulo comprendido entre el conductor y el vector de inducción magnética.

Regla nemotécnica: regla de la mano izquierda.

2.4.4 Ley de Biot-Savart

Otro efecto importante de interacción entre un campo magnético y su entorno es, si un conductor orientado de manera adecuada se desplaza a través de un campo magnético, se induce una tensión en él. La tensión inducida en el conductor está dada por:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = v \cdot B \cdot l \cdot \text{sen} \theta_2$$

Siendo:

v : velocidad del conductor.

B : inducción magnética.

θ_2 : ángulo comprendido entre el vector velocidad y el vector densidad de campo magnético. Regla nemotécnica: regla de la mano derecha. [4]



3 MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELO

En este capítulo se describen los materiales empleados en las distintas partes que forman el modelo y sus características.

3.1.1 Materiales empleados en la armadura

Todos los materiales conductores actuales (con alta conductividad eléctrica) y los materiales que conducen el flujo magnético (con alta permeabilidad magnética) se llaman materiales activos. Sirven para la excitación de f.e.m (fuerza electromotriz) y f.m.m. (fuerza magnetomotriz), concentran el flujo magnético en el lugar o dirección deseado para maximizar las fuerzas electrodinámicas. [4]

3.1.1.1 Núcleo de hierro o yugo

Como cualquier máquina eléctrica, el estudio de los materiales magnéticos integrantes de los motores lineales asíncronos, debe entenderse desde el nivel atómico. La mecánica cuántica define un parámetro χ_m denominado susceptibilidad magnética. Es coeficiente adimensional que expresa la proporcionalidad de imanación M y la intensidad de campo magnético H . De acuerdo con el valor de χ_m los materiales se clasifican en:

Diamagnéticos	χ_m es del orden -10^{-5}
Paramagnéticos	χ_m es del orden $+10^{-3}$
Ferromagnéticos	χ_m tiene un valor elevado

Tabla 3-1: Clasificación de materiales según χ_m

El tipo más importante de magnetismo lo presentan los materiales ferromagnéticos. Como primera aproximación, se dirá que reciben esta denominación aquellas sustancias que tienen imanaciones grandes aún en presencia de campos magnéticos muy débiles.

Así, un material ferromagnético está dividido en pequeñas regiones (dominios magnéticos), de forma que cada una de ellas está magnetizada en un determinado sentido. A escala macroscópica el material se presenta desmagnetizado.

Para que aparezca la magnetización deberá existir una dirección predominante en la orientación de los dominios. Los dominios cuya orientación esté más próxima a la del campo magnético externo experimentan un crecimiento independientemente de sus vecinos. Si se sigue incrementando el valor de H , el proceso de alineación continúa gradualmente, de tal forma que cuando los dominios estén alineados totalmente se dice que el material se ha saturado. Este comportamiento queda reflejado en la curva de imanación. La realización del proyecto diferencia dos tipos de estudios. [2]

1.- Curva de imanación lineal → **NO EXISTE SATURACIÓN**

Datos de la Armadura (Caso Lineal)

- Material: Fe
- Permeabilidad magnética relativa: 2500
- Linealidad magnética: Perfecta

$$B(H) = \mu_0 \mu_r H$$

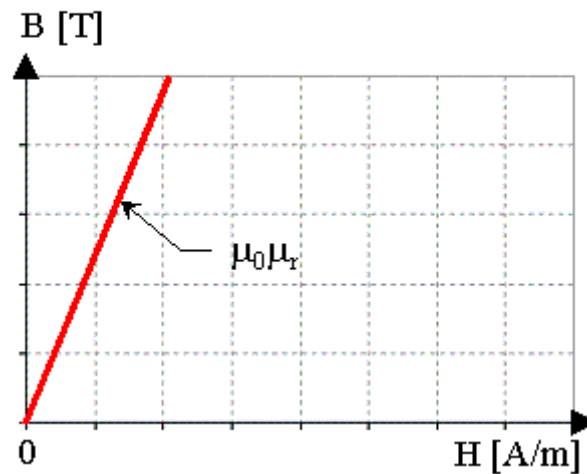


Figura 3-1: Curva B-H del Fe sin saturación

Siendo:

B : inducción magnética [T].

μ_o : permeabilidad magnética en el vacío [H/m].

μ_r : permeabilidad magnética relativa.

H : intensidad de campo magnético [A/m].

2.- Curva de imanación no lineal → PUEDE EXISTIR SATURACIÓN

Datos de la Armadura (Caso No Lineal)

- Material: Fe
- Permeabilidad magnética relativa variable: 2500
- Linealidad magnética: no lineal (existe saturación)

$$B(H) = \mu_0 H + \frac{2J_s}{\pi} \arctg\left(\frac{\pi(\mu_r - 1)\mu_0 H}{2J_s}\right)$$

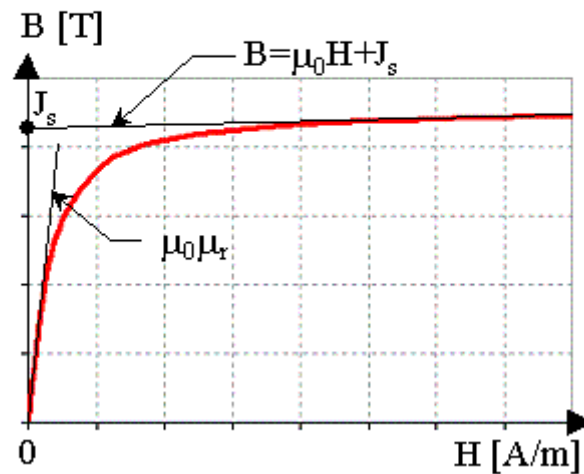


Figura 3-2: Curva B-H del Fe con saturación

Siendo:

B : inducción magnética [T].

μ_0 : permeabilidad magnética en el vacío [H/m].

μ_r : permeabilidad magnética relativa [H/m].

H : intensidad de campo magnético [A/m].

J_s : punto de saturación [T].

Los dominios magnéticos se alinean en la misma dirección que el campo aplicado. Si se modifica la orientación del campo, estos dominios no se reorientan automáticamente según la nueva dirección del campo, sino que experimentan una cierta resistencia a cambiar de orientación, histéresis, por lo que la rama de magnetización de la curva de imanación no es la misma que la rama de desmagnetización. Cuando el campo magnético externo se anula, no hay fuente alguna que ayude a que los dominios regresen a sus posiciones. Al valor en este punto se le conoce con el nombre de magnetismo o inducción remanente. Si se disminuye el campo hasta alcanzar un mínimo y después se invierte el sentido de cambio de H , llegamos a formar una curva cerrada denominada ciclo de histéresis.

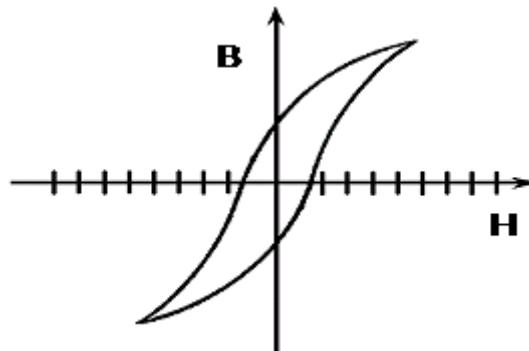


Figura 3-3: Ciclo de histéresis correspondiente al material ferromagnético

3.1.1.2 Conductores

Los devanados de la armadura en motores eléctricos están constituidos por un conductor sólido de cobre cuya sección transversal puede ser rectangular o circular. Cuando el precio o la masa del motor sean elevados, por ejemplo armaduras de elevada longitud para sistemas de transporte, vehículos de levitación magnética, etc. pueden ser empleados conductores de aluminio. [4]

Datos de los conductores

- | | |
|---|--------------------------------|
| • Material: | Cobre electrolítico comercial. |
| • Resistividad a 20° C [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$] | 0.01785. |
| • Conductividad a 20° C [$\text{S} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$] | 56. |
| • Coeficiente de temperatura [K-1] | 0.0039. |
| • Temperatura de régimen | 75° C |
| • Temperatura ambiente | 40 ° C |

$$T_{\text{máxima}} = T_{\text{régimen}} + T_{\text{ambiente}} \leq 115^{\circ} \text{C}$$

Nota: Los materiales aislantes aíslan eléctricamente los conductores de las otras piezas de máquinas eléctricas. No hay materiales aislantes para el flujo magnético. Los flujos pueden ser reducidos solamente formando apropiados circuitos magnéticos o usando las pantallas electromagnéticas o electrodinámicas. [4]

3.1.2 Materiales empleados en la jaula de ardilla

El circuito eléctrico del tipo jaula de ardilla se construye mediante barras conductoras de aluminio o de cobre, ubicadas en las ranuras (generalmente cerradas) distribuidas a lo largo de la periferia del paquete magnético de hierro. Todas las barras se cortocircuitan entre sí por sus extremos mediante dos anillos, uno para cada extremo de las barras.

4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Normalmente en un motor lineal, cualquiera de las dos partes constitutivas del motor puede funcionar como deslizador. En este caso se tiene una armadura (devanado) corta, por lo tanto se hará la jaula de ardilla más larga y estática, por lo que se denominará deslizador a la armadura.

Este modelo llevado al software Flux, ha implicado una serie de dificultades o problemas en la resolución de elementos finitos, por lo que manteniendo las dimensiones de la armadura, se ha utilizado ésta en la aplicación de estudio como parte fija, siendo la parte móvil la jaula de ardilla (en la aplicación real la parte móvil es la armadura).

No se ha modificado de dimensiones la armadura (no se han añadido módulos), porque esto modificaría el circuito eléctrico primario.

Para dibujar el modelo, se ha utilizado la armadura del prototipo ya construido, por lo que se han tomado sus medidas y se ha realizado el diseño mediante el software Flux. Versión 10.3. Posteriormente, se han analizado los resultados proporcionados por el software utilizado.

4.1.1 Dimensiones del modelo

En la figura 4-1 se pueden observar las cotas más importantes del modelo del motor lineal asíncrono utilizado en el proyecto:

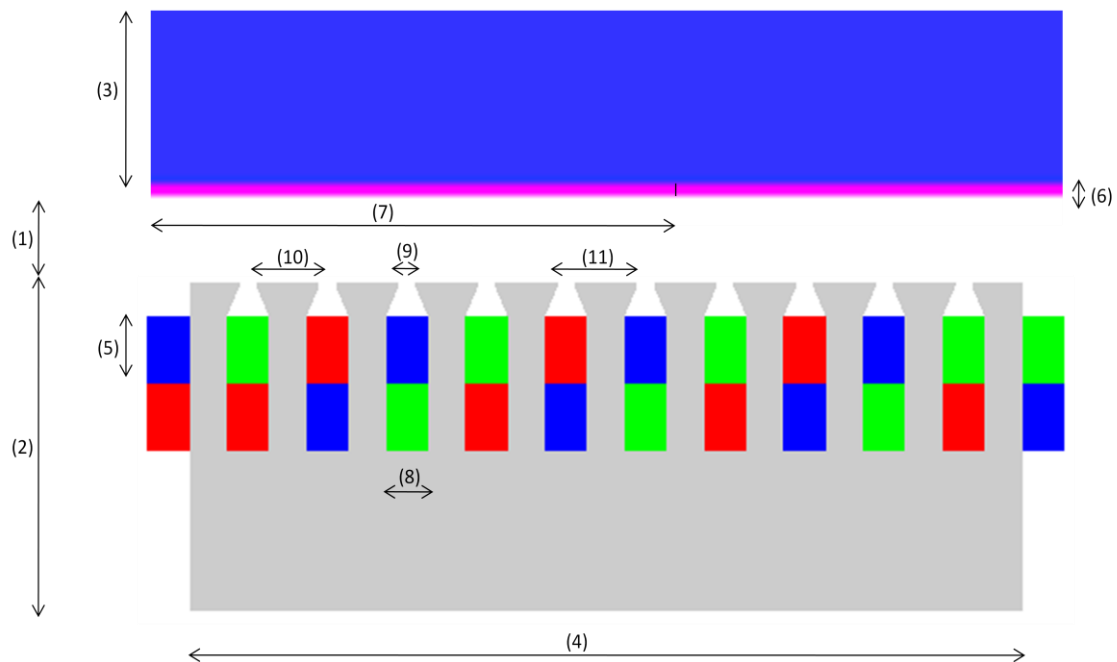


Figura 4-1: Dimensiones del motor lineal asíncrono



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

A continuación se definen las dimensiones más importantes referentes al motor lineal asíncrono utilizado en el proyecto y representado en la figura 4-1.

- (1): Altura del entrehierro= 3 mm.
- (2): Altura de la armadura = 77,5 mm.
- (3): Altura de la chapa de hierro de la jaula de ardilla = 20 mm.
- (4): Anchura de la armadura = 199 mm.
- (5): Altura de la ranura de la bobina = 16 mm.
- (6): Espesor de la barra de la jaula de ardilla = 1 mm.
- (7): Anchura de la barra de la jaula de ardilla = 125 mm.
- (8): Anchura de la ranura de la bobina = 10 mm.
- (9): Anchura de la ranura de la armadura = 4 mm.
- (10): Anchura del diente de la armadura = 15 mm.
- (11): Paso ranura = 19 mm.

El motor tiene una profundidad de 48 mm.

4.1.2 Método de análisis: Teoría de elementos finitos

Es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- El medio continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema complejo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas continuas y pasan a ser el valor de éstas en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación ó funciones de forma.

El MEF (Método de los Elementos Finitos), por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado. Esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos. [5]



4.1.3 Software empleado. Flux. Versión 10.3

Flux. Versión 10.3 es un programa para el cálculo por elementos finitos que dispone de tres módulos de trabajo:

1. Construcción del modelo

Es donde se prepara el modelo para el cálculo, se realizan las operaciones de:

- Dibujo del modelo.
- Selección de los materiales a emplear, que pueden obtenerse por librerías, o ser definidos por el usuario. Se pueden definir las propiedades físicas de los materiales, sus propiedades eléctricas, magnéticas, térmicas, etc., tales como la densidad de corriente, la conductividad, la resistividad, si es lineal, si es no lineal, etc.
- Cinemática de acoplamiento, se pueden definir las partes fijas, las partes móviles, la velocidad, el deslizamiento, cargas acopladas, etc.
- Acoplamiento de un circuito eléctrico.
- Aplicación de las condiciones de contorno del modelo.
- Mallado de los componentes del modelo.

2. Proceso de resolución

Es la parte del programa que realiza el cálculo y genera las soluciones.

El procesador de la solución está basado en el método de elementos finitos para proporcionar el valor de las variables en cada nodo de la malla.

Las principales tareas llevadas a cabo por el proceso de resolución son las siguientes:

- Flux analiza los elementos uno a uno, calcula las integrales, construye la sub-matriz, relaciona cada elemento y el montaje de las sub-matrices elementales a fin de construir la matriz general del conjunto de ecuaciones lineales que hay que resolver. Es durante este montaje donde las condiciones de contorno se tienen en cuenta. [6]
- La solución del conjunto de ecuaciones lineales se realiza por el método CICG (incompleta Choleski gradientes conjugados). [6]
- Si existen ecuaciones no lineales (hay propiedades físicas que varían de forma no lineal), estos cálculos se repiten en los elementos no lineales, de acuerdo con un proceso iterativo (Newton-Raphson). [6]

Los pasos que puede realizar el usuario son los siguientes:

- Configurar los parámetros de cálculo, tales como intervalos de tiempo, de deslizamiento, de posición, de frecuencia, etc.
- Elegir el número de iteraciones y la precisión requerida.
- Inicio del cálculo: el programa empieza a resolver el sistema de ecuaciones y genera la solución.



3. Análisis de los resultados

Es la herramienta que permite la representación de los resultados, se pueden obtener valores, realizar animaciones y gráficos del modelo utilizado.

Flux dispone de tres tipos de aplicaciones según los estudios que se quieran realizar:

A) “Magneto Static”:

Estudio estático: el campo magnético es creado por corrientes estacionarias.

B) “Transient Magnetic”:

Estudio evolutivo: el campo magnético es creado por corrientes variables (variable de estado / estado transitorio).

La aplicación “Transient Magnetic” permite el estudio de los fenómenos creados por un campo magnético variable en el tiempo y permite considerar corrientes inducidas (corrientes de Foucault).

C) “Steady State AC Magnetic”:

Estudio del estado estacionario de AC: el campo magnético es creado por corrientes sinusoidales.

Permite el estudio de los dispositivos en el estado armónico (estado estacionario sinusoidal), para una frecuencia dada.

Esta aplicación tiene en cuenta las corrientes inducidas en las regiones de la realización (corrientes de Foucault).

Flux ofrece la posibilidad de trabajar en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D).

En cuanto a nuestro modelo, el estudio estático ha sido realizado con la aplicación “Magneto Static”, mientras que el estudio dinámico ha sido realizado con la aplicación “Steady state AC Magnetic”, en los dos estudios se ha trabajado en dos dimensiones (2D).

5 ANÁLISIS DE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA PRESENTE EN LA MÁQUINA

5.1 Objetivo

Se tiene como objetivo conseguir una distribución espacial adecuada, lo más senoidal posible, de la inducción magnética en el entrehierro de la máquina creada por las corrientes de la armadura, y así, obtener un buen funcionamiento para un régimen nominal determinado.

5.2 Configuración del devanado

El método más sencillo para obtener una variación espacial sinusoidal de una inducción magnética en el entrehierro a lo largo de la máquina, consiste en que las bobinas que componen las distintas fases se encuentren dispuestas en ángulos diferentes a lo largo de la periferia de la máquina.

En las figura 5-1 y 5-2 se puede observar que en el modelo a estudiar el devanado no es distribuido, ya que tiene una única bobina por polo y fase. Nuestro modelo consta de cuatro polos y se puede observar que el lado de vuelta de la bobina se produce antes de transcurrir un paso polar, por lo que este devanado se denomina de paso acortado.

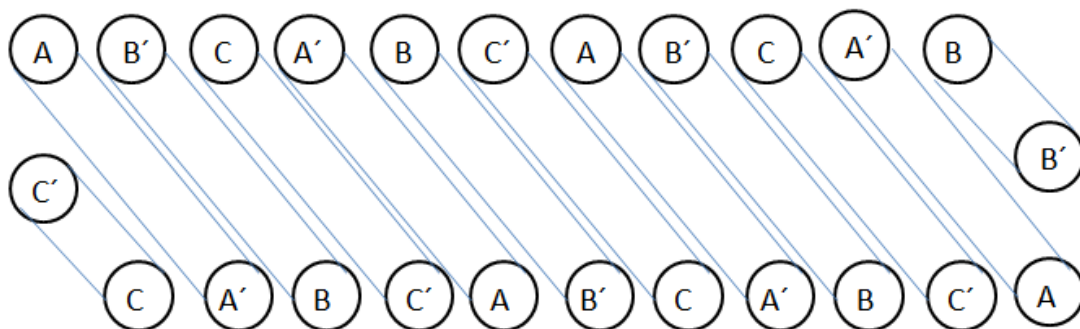


Figura 5-1: Topología del devanado: paso acortado

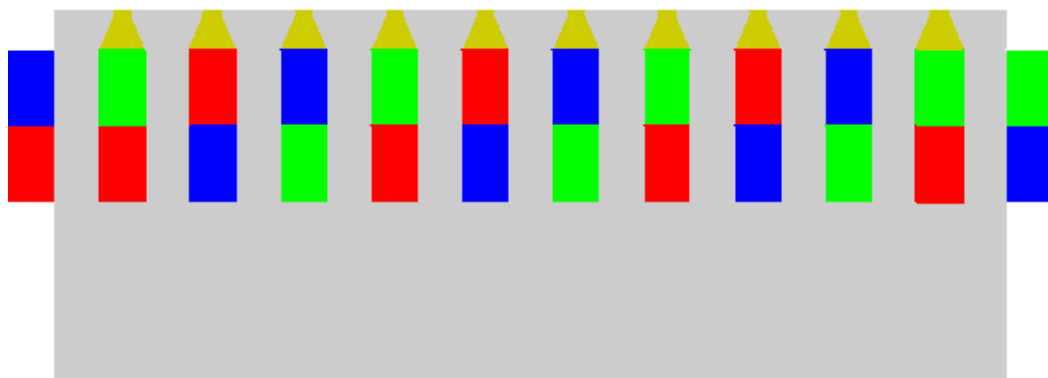


Figura 5-2: Distribución de fases por colores en la armadura

Debido a que se sitúan dos lados de bobina por ranura, el arrollamiento se considera de dos capas, ya que un lado de la bobina está situado en la parte superior de una ranura y el otro lado está situado en la parte inferior de la otra.

Desde el punto de vista de la forma de las bobinas, esta configuración sería de devanados excéntricos, por estar constituidos por bobinas de igual paso pero desfasadas entre sí en el espacio.

5.3 Configuración de corrientes de la armadura

- Número de bobinas: 12.
- Número de espiras en cada bobina: 100 espiras.
- Dimensiones de la ranura de la bobina:

$$S = h \cdot b = 160 \text{ mm}^2$$

Siendo:

h : altura = 16 mm.

b : Anchura = 10 mm.

S : Superficie = 160 mm².



Figura 5-3: Dimensiones de la ranura de la bobina

El conexionado de las bobinas se muestra en el esquema eléctrico de la figura 5-4.

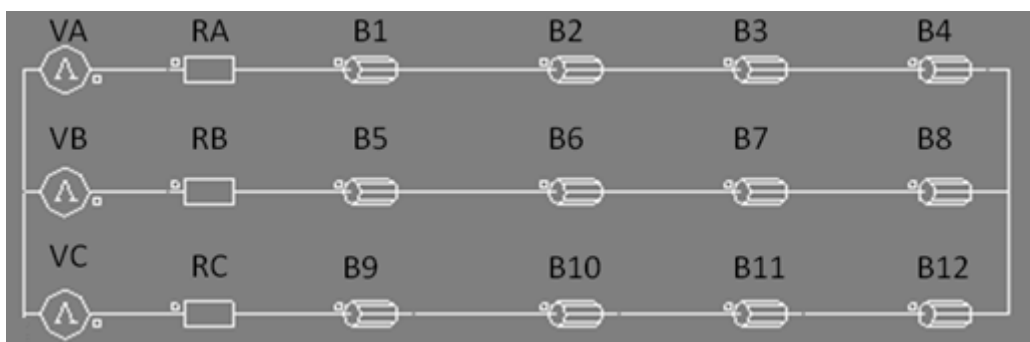


Figura 5-4: Esquema del circuito eléctrico de la armadura o estator



5.3.1 Teorema de Ferraris generalizado para una máquina lineal

Para que se desplace linealmente el campo magnético creado por la armadura, se aplicará un conjunto de corrientes a los conductores de la armadura según el sistema trifásico de corrientes. De este modo, si un conjunto de corrientes trifásicas, cada una de igual magnitud y desfasadas 120° , fluye en un devanado trifásico, se producirá un campo magnético de magnitud constante y de valor 1,5 veces la amplitud de una fase que se desplaza a lo largo del eje x (Teorema de Ferraris).

5.3.2 Sistema trifásico directo de corrientes

Existe una recomendación de las Normas CEI (Comité Electrotécnico Internacional) para conocer las polaridades de los devanados, sin tener en cuenta el sentido de los arrollamientos para cada una de las fases. Se representará como lado negativo del devanado a aquel que esté primado y lado positivo al que no se encuentre primado. [2]

Este convenio responde únicamente a criterios constructivos de los devanados del motor y por lo tanto es independiente del valor de la corriente que circule por ellos. Atendiendo al valor de la corriente para cada instante se establece lo siguiente:

- 1.-Si la corriente para un determinado instante tiene valor positivo y circula por el lado positivo del devanado toma sentido positivo y se dirá que sale del lado de bobina, ya que Flux toma como sentido positivo el saliente del plano de dibujo según el triedro directo. Se representa por un punto.
- 2.-Si la corriente para un determinado instante tiene valor negativo y circula por el lado positivo del devanado toma sentido negativo y se dirá que entra en el lado de la bobina. Se representa por un aspa.
- 3.-Si la corriente para un determinado instante tiene valor positivo y circula por el lado negativo del devanado toma sentido negativo y se dirá que entra en la bobina. Se representa por un aspa.
- 4.-Si la corriente para un determinado instante tiene valor negativo y circula por el lado negativo del devanado toma sentido positivo y se dirá que sale de la bobina. Se representa por un punto.

Fase	Sentido (wt=0°)	Corrientes [A]
A	●	$I_p \cdot \cos(wt)$
A'	⊗	$I_p \cdot \cos(wt - 180)$
B	⊗	$I_p \cdot \cos(wt - 120)$
B'	●	$I_p \cdot \cos(wt + 60)$
C	⊗	$I_p \cdot \cos(wt + 120)$
C'	●	$I_p \cdot \cos(wt - 60)$

Tabla 5-1: Configuración de corrientes aplicadas al motor lineal síncrono



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

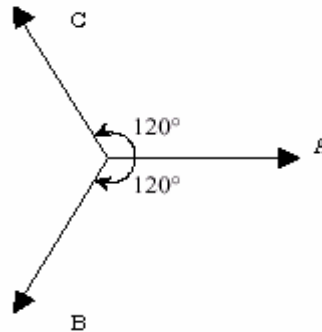


Figura 5-5: Sistema trifásico directo de corrientes

El sentido de la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) resultante en la armadura viene determinado por el sistema de corrientes.

En $wt = 0^\circ = 0 \text{ rad}$, la circulación de la corriente máxima tiene lugar en la fase A. Según la ley de Ampère se producirá un campo magnético de módulo máximo, de dirección perpendicular al plano formado por la espira AA' y el sentido vendrá determinado por la regla de la mano derecha.

Fase	A	A'	B	B'	C	C'
J (A/mm ²)	10	-10	-5	5	-5	5

Tabla 5-2: Densidad de corriente (J) en $wt = 0^\circ = 0 \text{ rad}$

En $wt = 120^\circ = 2 \cdot \pi / 3 \text{ rad}$, la circulación de la corriente máxima tiene lugar en la fase B. Según la ley de Ampère se producirá un campo magnético de módulo máximo, de dirección perpendicular al plano formado por la espira BB' y el sentido vendrá determinado por la regla de la mano derecha.

Fase	A	A'	B	B'	C	C'
J (A/mm ²)	-5	5	10	-10	-5	5

Tabla 5-3: Densidad de corriente (J) en $wt = 120^\circ = 2 \cdot \pi / 3 \text{ rad}$

En $wt = 240^\circ = 4 \cdot \pi / 3 \text{ rad}$, la circulación de la corriente máxima tiene lugar en la fase C. Según la ley de Ampère se producirá un campo magnético de módulo máximo, de dirección perpendicular al plano formado por la espira CC' y el sentido vendrá determinado por la regla de la mano derecha.

Fase	A	A'	B	B'	C	C'
J (A/mm ²)	-5	5	-5	5	10	-10

Tabla 5-4: Densidad de corriente (J) en $wt = 240^\circ = 4 \cdot \pi / 3 \text{ rad}$



5.3.3 Velocidad de sincronismo

El devanado de nuestro modelo (fig. 5-1) producirá dos polos norte y dos polos sur en la armadura, es decir, cuatro polos en movimiento que se desplazarán en un movimiento lineal sobre la dirección deseada.

Definiremos paso ranura como la siguiente distancia:

$$\tau_s = b_{\text{diente armadura}} \cdot b_{\text{ranura armadura}} = 15 + 4 = 19 \text{ mm}$$

Siendo:

τ_s : paso ranura [mm].

$b_{\text{diente armadura}}$: anchura del diente de la armadura [mm].

$b_{\text{ranura armadura}}$: anchura de la ranura de la armadura [mm].

Debido a que la misma fase se repite cada tres pasos ranura, definiremos paso polar como la siguiente distancia:

$$\tau_p = 3 \cdot \tau_s = 3 \cdot 19 = 57 \text{ mm}$$

Siendo:

τ_p : paso polar [mm].

Para determinar la velocidad lineal del campo magnético creado por la armadura, hay que calcular la velocidad de sincronismo:

$$v_s = 2 \cdot \tau_p \cdot f = 2 \cdot 57 \cdot 50 = 5700 \text{ mm/s} = 5,7 \text{ m/s}$$

Siendo:

v_s : velocidad de sincronismo [m/s].

f : frecuencia [Hz].

El deslizamiento (s) de nuestro modelo, se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes de la armadura (V_s) y la velocidad mecánica lineal de la jaula de ardilla (V), y se expresa en valor “por unidad” respecto a la velocidad síncrona.

$$s = \frac{v_s - v}{v_s}$$

Por lo que:

$$v = v_s \cdot (1 - s)$$

Por convenio se asigna signo positivo a la velocidad síncrona. Por esta razón, si la jaula de ardilla se desliza en el mismo sentido que el campo lineal, su velocidad es positiva, y si se desliza en sentido contrario, su velocidad es negativa.



5.3.4 Concepto de sincronismo

Si en el motor lineal asíncrono existen dos campos magnéticos, se creará un empuje en la dirección del movimiento que tiende a alinearlos. Un campo magnético es producido por la armadura y el otro es producido por la jaula de ardilla. El empuje inducido en la parte móvil obligará a que ésta se desplace para alinearse con el campo inductor, es decir, se tratará de alcanzar un estado de mínima energía. Pero en un motor asíncrono esta coincidencia de campos es imposible de alcanzar ya que si se alcanzase, la frecuencia del flujo visto en la parte inducida, sería cero y no habría tensión inducida (Faraday), como consecuencia no habría corrientes inducidas ni campo magnético inducido, y la máquina se quedaría sin empuje.

La parte móvil es la jaula de ardilla y por lo tanto el empuje será inducido en ella.

Nota: En la aplicación real, la parte fija es la jaula de ardilla y la parte móvil es la armadura, aunque como se ha citado anteriormente, en el modelo Flux esto implica problemas en la resolución de elementos finitos, por lo que en la aplicación de estudio se utiliza la jaula de ardilla como parte móvil y la armadura como parte fija.

5.4 Análisis de la inducción magnética presente en el entrehierro

Para poder considerar correctos los valores de inducción magnética en el entrehierro, atendiendo a criterios de diseño, los valores máximos de inducción magnética en el entrehierro deben estar comprendidos entre 0.60 y 0.75 T, pudiendo alcanzar en el diente de la armadura valores de 1,6 a 2,2 veces superior. [7]

6 ESTUDIO ESTÁTICO DE UN MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN

Para realizar el estudio de la inducción magnética presente en la máquina, conviene tener en cuenta las siguientes definiciones:

Entrehierro físico o entrehierro mecánico: porción de aire situado entre la armadura y la jaula de ardilla.

Entrehierro magnético: porción de aire situado entre la armadura y la jaula de ardilla, y además porción de aluminio de la jaula de ardilla ($\mu_r \text{ aire} = \mu_r \text{ Al} = 1$).

Como puede observarse en la figura 6-1, para realizar el estudio adecuado de la inducción magnética, el análisis se realiza en la mitad del entrehierro magnético, correspondiente a la distancia entre los dos planos paralelos de material ferromagnético correspondientes al hierro de los dientes y al hierro de la placa de respaldo de la jaula de ardilla.

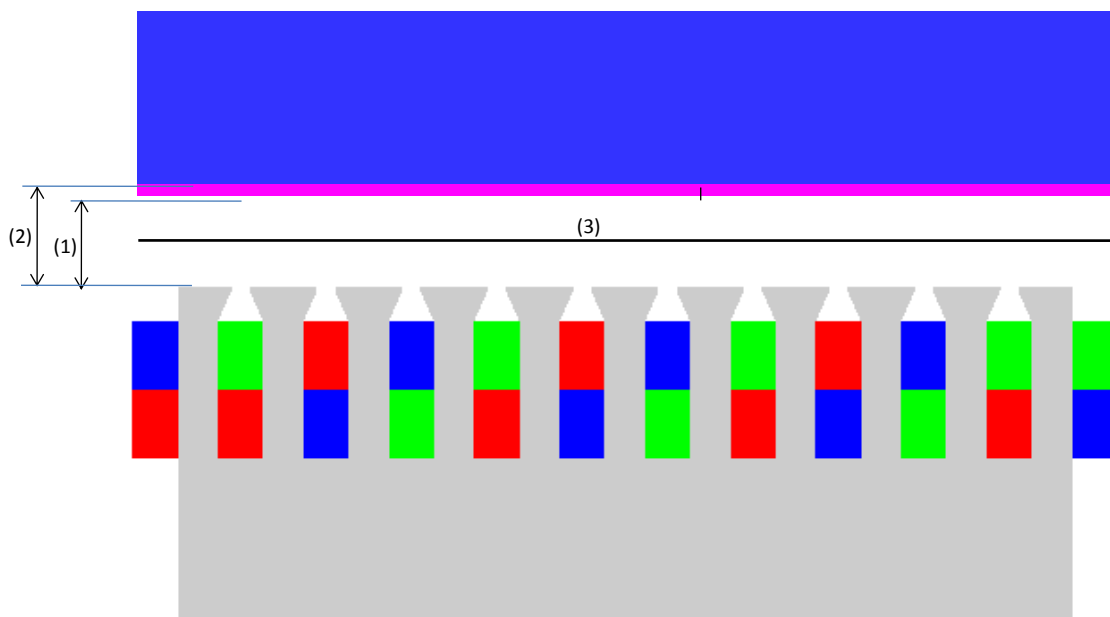


Figura 6-1: Situación del entrehierro mecánico y magnético

En referencia a la figura 6-1 se define:

- (1) entrehierro físico o entrehierro mecánico.
- (2) entrehierro magnético.
- (3) path donde se realiza el análisis de la inducción magnética.

***Nota:** La inducción magnética presente en el entrehierro se satura si el path no está situado en la mitad del entrehierro magnético, por lo que el path debe estar situado en la mitad del entrehierro magnético para que ningún pico de la curva B se sature.*

6.1 Estudio estático lineal

A continuación se va a realizar un estudio estático del tipo lineal suponiendo las siguientes características de la armadura:

- Material: Fe
- Permeabilidad magnética relativa: 2500
- Linealidad magnética: Perfecta

6.1.1 Distribución de fases en el devanado de la armadura

En un principio se utiliza la distribución de fases en el devanado de la armadura que se muestra en la figura 6-2.

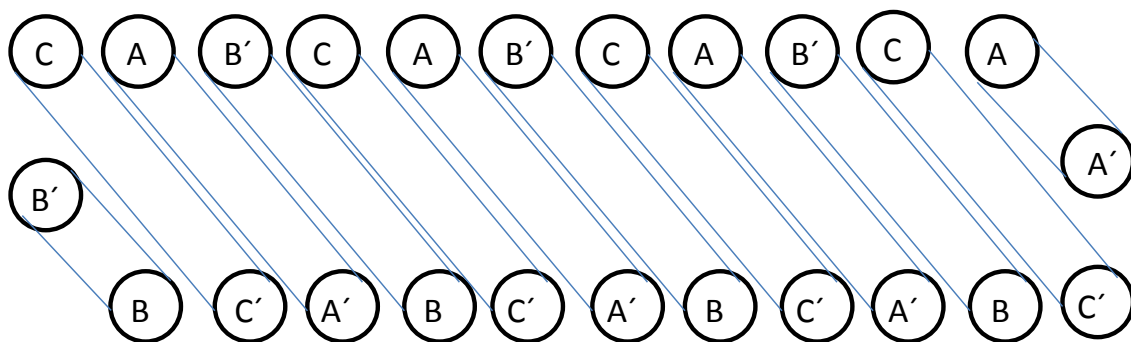


Figura 6-2: Errónea distribución de fases en el devanado de la armadura

Con la distribución de fases del devanado de la figura 6-2, se obtiene la inducción magnética que se representa en la figura 6-3.

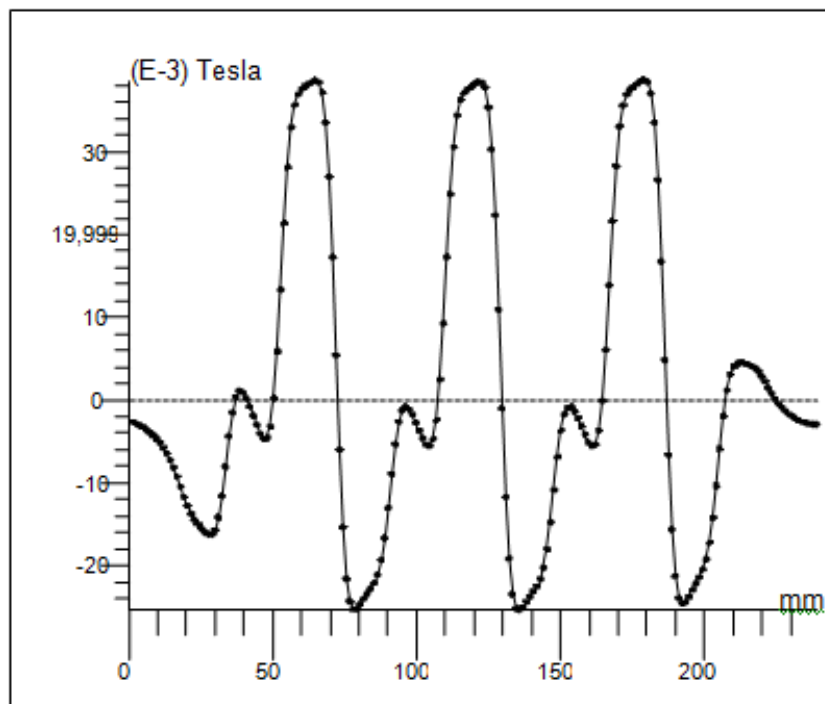


Figura 6-3: Inducción magnética de la errónea distribución de fases en el devanado de la armadura

Como se puede comprobar en la figura 6-3 la distribución de la inducción no es puramente senoidal, debido fundamentalmente a que en la capa superior no existe alternancia entre lados positivos y negativos (primas – no primas) en los lados de cada bobina. Lo mismo ocurre con las capas inferiores del devanado (ver figura 6-2).

Se hace esta comprobación porque en el modelo prototipo no se podía comprobar perfectamente la verdadera distribución de los lados de ida y de vuelta.

Tras realizar un nuevo análisis del modelo, se detecta que la distribución de fases no es la indicada en la figura 6-2, por lo que la autentica distribución de los lados de ida y de vuelta del devanado se muestra en la figura 6-4.

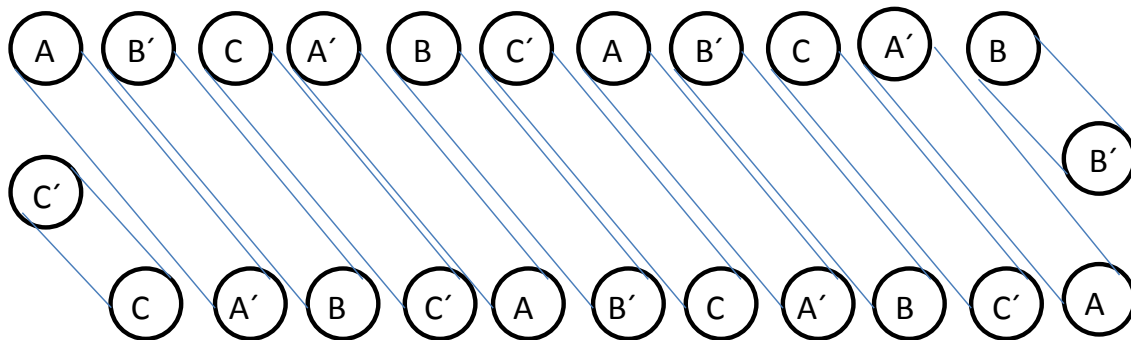


Figura 6-4: Auténtica distribución de fases en el devanado de la armadura

Con la distribución de fases del devanado de la figura 6-4, se obtiene la inducción magnética que se representa en la figura 6-5.

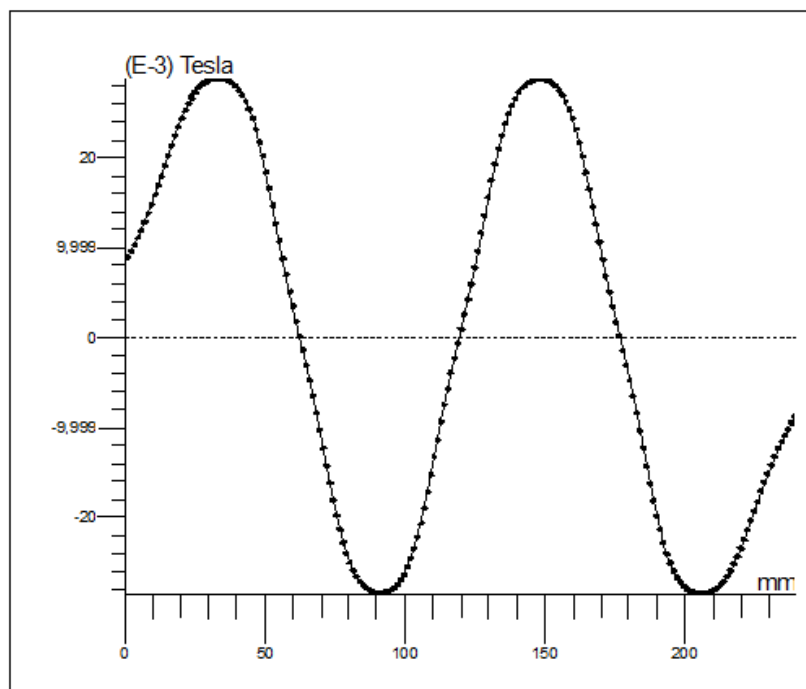


Figura 6-5: Inducción magnética de la auténtica distribución de fases en el devanado de la armadura



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

En la figura 6-5 se puede apreciar que la inducción magnética es sinusoidal. Por lo que esta distribución de fases del devanado es la correcta y la que se utilizará en adelante.

6.1.2 Variación de parámetros para la obtención de valores máximos de inducción magnética adecuados en el entrehierro

Para poder considerar correctos los valores de inducción magnética, los valores máximos de inducción en el entrehierro deben estar comprendidos entre 0,60 y 0,75 teslas (T).

Los parámetros de inicio de la máquina son los siguientes:

- Densidad de corriente por ranura = 3 A/mm^2 .
- Altura del entrehierro mecánico (aire entre armadura y jaula de ardilla) = 10 mm
- Altura del entrehierro magnético (aire situado entre la armadura y la jaula de ardilla, y además altura de las barras de la jaula de ardilla) = 30 mm.
- Espesor de las barras de la jaula de ardilla = 20 mm.
- Espesor de la chapa de hierro de la jaula de ardilla = 20 mm.

Para conseguir que el modelo estudiado en este proyecto tenga un buen funcionamiento como motor, se desea obtener una inducción máxima de 0,75 T.

Para obtener una inducción máxima de 0,75 T ($B_{\text{máx.}} = 0,75 \text{ T}$), se pueden variar tres parámetros:

1. La densidad de corriente por ranura.
2. La altura del entrehierro mecánico (aire que está situado entre la armadura y la jaula de ardilla).
3. El espesor de las barras de la jaula de ardilla.

Nota: La suma de la altura del entrehierro mecánico y de la altura del espesor de la barra de la jaula de ardilla, es igual a la longitud del entrehierro magnético.

Para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 3 A/mm^2 , se obtiene la inducción magnética que se representa en la figura 6-6.

Fase	A	A'	B	B'	C	C'
J (A/mm^2)	3	-3	-1,5	1,5	-1,5	1,5

Tabla 6-1: Densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 3 A/mm^2

Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

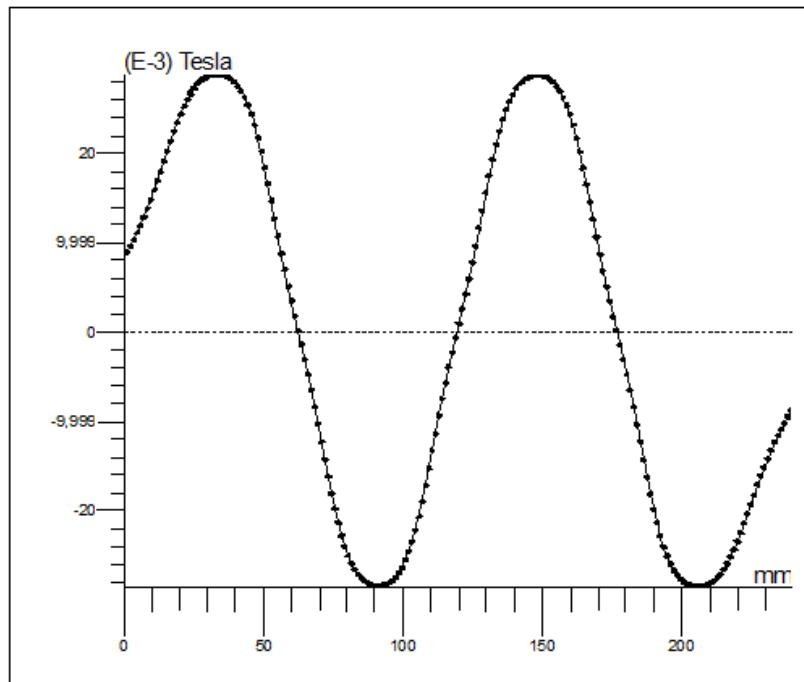


Figura 6-6: Inducción magnética para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 3 A/mm^2

Se puede observar en la figura 6-6 que con una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 3 A/mm^2 se obtiene una inducción máxima de 28 mT, por lo que se procede a aumentar a 6 A/mm^2 dicha densidad de corriente para intentar obtener los 750 mT deseados.

Fase	A	A'	B	B'	C	C'
J (A/mm^2)	6	-6	-3	3	-3	3

Tabla 6-2: Densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 6 A/mm^2

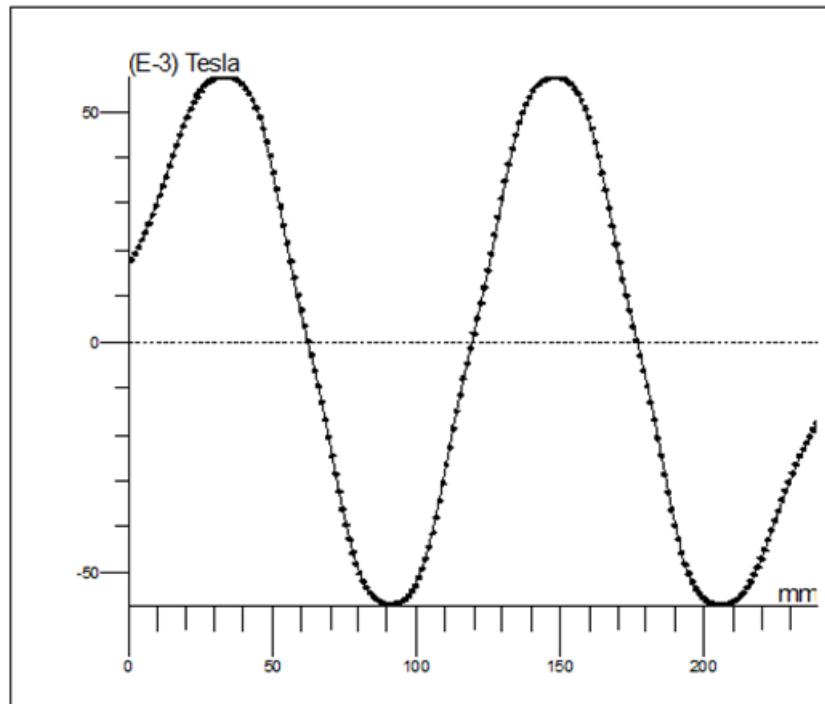


Figura 6-7: Inducción magnética para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 6 A/mm^2

Como puede observarse en la figura 6-7, con una densidad de corriente de 6 A/mm^2 se obtiene una inducción máxima de 55 mT , por lo que continúa sin ser suficiente y además el aumento de la inducción máxima que se ha conseguido al aumentar de 3 A/mm^2 a 6 A/mm^2 de densidad de corriente ha sido muy pequeño, de 28 mT a 58 mT en comparación con los 750 mT que se quieren obtener.

Debido a las restricciones que supone el uso de densidades de corrientes altas ($J_{\text{máx.}} = 10 \text{ A/mm}^2$), se procede a variar la altura del entrehierro mecánico (aire que está situado entre la armadura y la jaula de ardilla) que es de 10 mm .

Después de realizar pruebas con distintas alturas del entrehierro mecánico para una densidad de corriente de 6 A/mm^2 , se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6-3.

Altura entrehierro mecánico (mm)	10	7	5	3	1
Inducción máxima (mT)	58	66	72	81	86

Tabla 6-3: Variación altura entrehierro mecánico

En la tabla 6-3 puede apreciarse que al disminuir la altura del entrehierro físico, aumenta la inducción máxima.

Con el objetivo de conseguir un buen funcionamiento del motor asíncrono, se estima que es más apropiado reducir el entrehierro mecánico hasta una altura de 3 mm , ya que la altura de 1 mm resultaría una longitud excesivamente pequeña.

En la figura 6-8 se representa la inducción magnética obtenida para una altura del entrehierro mecánico de 3 mm y una densidad de corriente de 6 A/mm^2 .

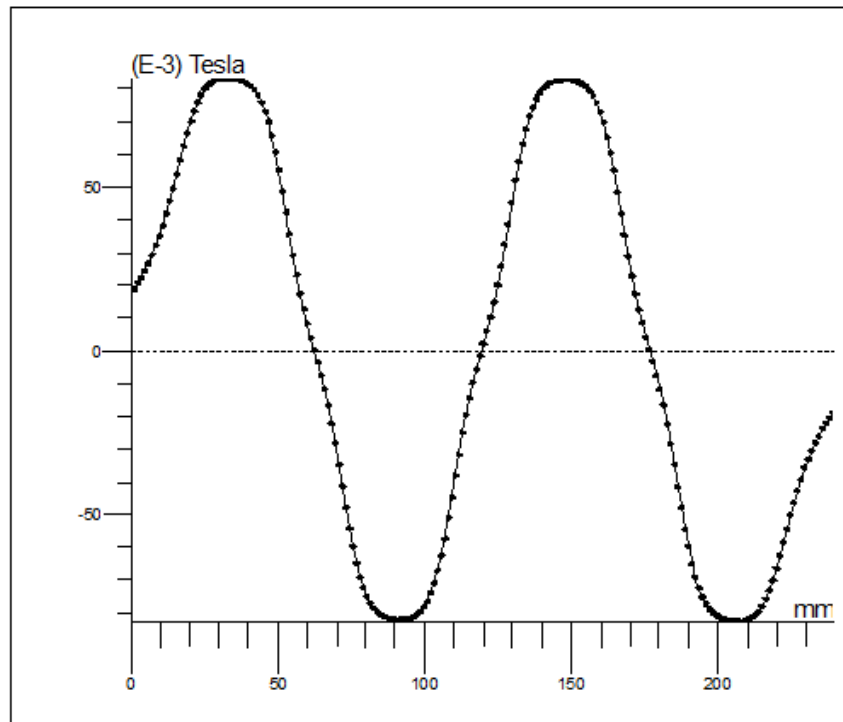


Figura 6-8: Inducción magnética para una altura del entrehierro mecánico de 3 mm

Como puede observarse en la figura 6-8, se consigue aumentar de una inducción magnética máxima de 58 mT para altura del entrehierro mecánico de 10 mm, a una inducción magnética máxima de 81 mT para altura del entrehierro mecánico de 3 mm.

Pero todavía no es suficiente puesto que se quiere obtener una inducción máxima de 750 mT. Por lo que se procede a variar el espesor de las barras de la jaula de ardilla, que es de 20 mm.

Después de realizar pruebas para distintos espesores de las barras de la jaula de ardilla, con una densidad de corriente de 6 A/mm^2 , se obtienen los resultados de la tabla 6-4.

Espesor barras jaula de ardilla (mm)	20	10	6	5	3	1
Inducción máxima (mT)	81	136	195	224	292	446

Tabla 6-4: Variación espesor barras jaula de ardilla

En la tabla 6-4 puede apreciarse que al disminuir el espesor de las barras de la jaula de ardilla, aumenta la inducción máxima. Por lo que puede observarse que se ha dado un salto cuantitativo importante en los valores de inducción máxima. Así pues, se procede a reducir el espesor de las barras de la jaula de ardilla hasta 1 mm.

En la figura 6-9 se representa la inducción magnética obtenida para un espesor de las barras de la jaula de ardilla de 1 mm.

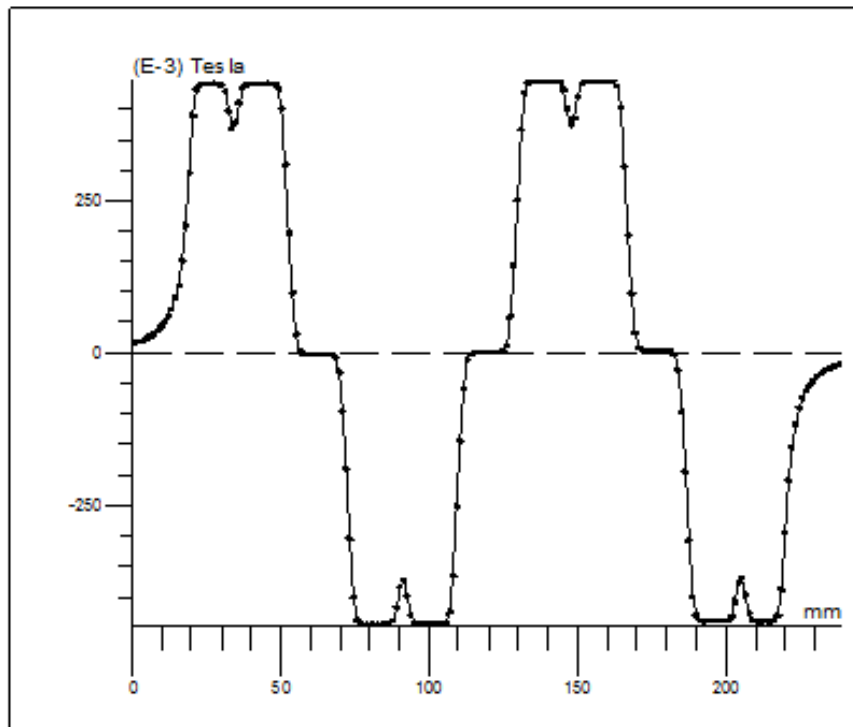


Figura 6-9: Inducción magnética para un espesor de las barras de la jaula de ardilla 1 mm

Como puede observarse en la figura 6-9, se consigue aumentar la inducción magnética máxima hasta 446 mT, por lo que se ha pasado de tener 81 mT con 20 mm de espesor de las barras de la jaula de ardilla, a los 446 mT con 1 mm de espesor, todo esto para una densidad de corriente de 6 A/mm² y una altura del entrehierro mecánico de 3 mm.

Aunque se aproxima, todavía no se obtiene una inducción máxima de 750 mT, por lo que se procede a variar la densidad de corriente para intentar alcanzarla.

Contando con el requisito de que la densidad de corriente máxima ($J_{\text{máx.}}$) que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre es de 10 A/mm², siempre que se restrinja el régimen de funcionamiento del motor, entonces:

$$J_{\text{máx. conductor Cu}} = \frac{I_{\text{máx. Cu}}}{S_{\text{ranura}} \cdot K} = \frac{J_{\text{máx. ranura Cu}}}{K}$$

Siendo:

$J_{\text{máx. conductor Cu}}$: densidad de corriente máxima que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre.

$J_{\text{máx. ranura Cu}}$: densidad de corriente máxima que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre.

$I_{\text{máx. Cu}}$: corriente máxima que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre.

S_{ranura} : superficie de la ranura.

K : factor de relleno = como aproximación para el cálculo lo estimamos en 1.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Por lo que se procede a aumentar de 6 A/mm^2 a 10 A/mm^2 la densidad de corriente por ranura en la fase A para intentar obtener los 750 mT deseados.

Fase	A	A'	B	B'	C	C'
J (A/mm ²)	10	-10	-5	5	-5	5

Tabla 6-5: Densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 10 A/mm^2

En la figura 6-10 se representa la inducción magnética obtenida para una densidad de corriente por ranura en la fase A de 10 A/mm^2 .

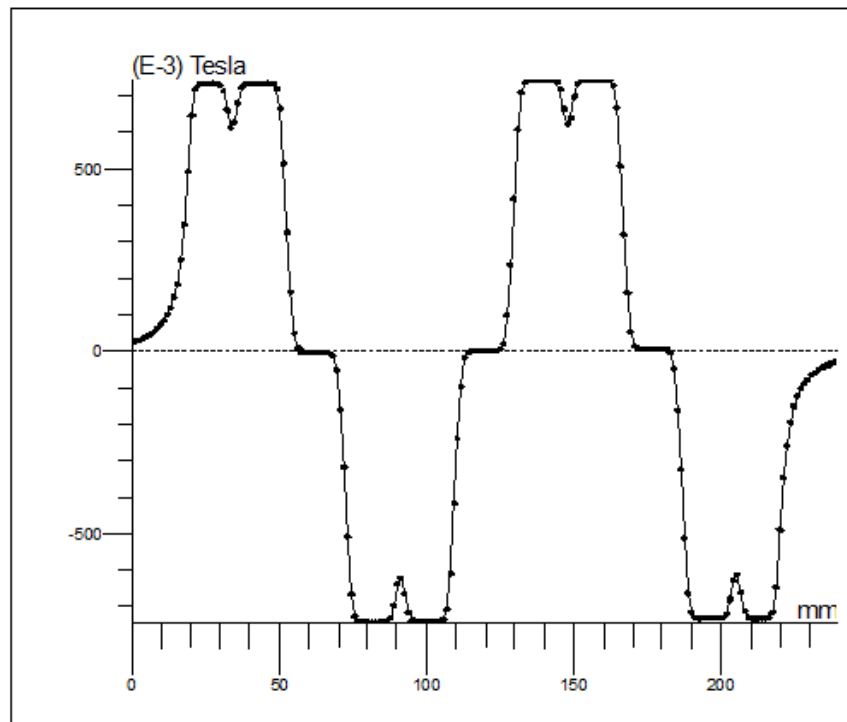


Figura 6-10: Inducción magnética para una densidad de corriente (J) por ranura en la fase A de 10 A/mm^2

Como puede observarse en la figura 6-10, se consigue aumentar la inducción magnética máxima hasta 740 mT, por lo que se ha pasado de tener 446 mT con una densidad de corriente por ranura de 6 A/mm^2 , a los 740 mT que se obtienen con una densidad de corriente por ranura en la fase A de 10 A/mm^2 . Por lo que se da por buena la inducción magnética máxima ya que se aproxima en gran medida a los 750 mT que se querían obtener.

El efecto que se produce en los picos de la curva de la inducción magnética, es debido a las ranuras y dientes presentes en la armadura. Para ello se ha utilizado el módulo de “Magneto Static” de Flux. La parte plana en los valores máximos es debido al entrehierro pequeño con el que se está trabajando, poniéndose de manifiesto los armónicos de ranura, ya que hay poca dispersión de flujo y produce un valor constante en la inducción en la zona correspondiente al diente:



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

$$R = L / (\mu_{\text{aire}} \cdot S)$$

Siendo:

R : reluctancia magnética.

L : longitud del diente.

μ_{aire} : permeabilidad del aire.

S : superficie del diente.

Y teniendo en cuenta que:

$$\Phi \cdot R = N (\text{cte}) \cdot I (\text{cte})$$

Y que:

$$B = \Phi / S$$

Siendo:

Φ : flujo magnético.

N : número de espiras.

I : intensidad de corriente.

B : inducción magnética.

Se concluye que:

Como la μ_{aire} es muy baja \rightarrow la R aumenta \rightarrow el Φ disminuye \rightarrow la B baja

Por lo que las longitudes de 3 mm de aire, 1 mm de aluminio y 20 mm de hierro son las propicias para conseguir los casi 750 mT que buscaba.

Por lo que se puede concluir que después de todas las variaciones mencionadas, y al conseguir una inducción magnética máxima de 0,74 T, este valor está comprendido entre 0,60 y 0,75 T, que son los valores que se pueden considerar correctos de inducción magnética máxima en el entrehierro.

Por lo que el modelo queda caracterizado con los siguientes parámetros:

- Densidad de corriente por ranura = 10 A/mm².
- Altura del entrehierro mecánico (aire entre armadura y jaula de ardilla) = 3 mm.
- Altura del entrehierro magnético (aire situado entre la armadura y la jaula de ardilla, y además altura de las barras de la jaula de ardilla) = 4 mm.
- Espesor de las barras de la jaula de ardilla = 1 mm.
- Espesor de la chapa de hierro de la jaula de ardilla = 20 mm.

6.1.3 Efecto de borde

Partiendo de la distribución de fases en el devanado de nuestro motor lineal asíncrono (fig. 6-11) y de la representación de su correspondiente inducción magnética (fig. 6-12), se va a estudiar el efecto de borde que se produce.

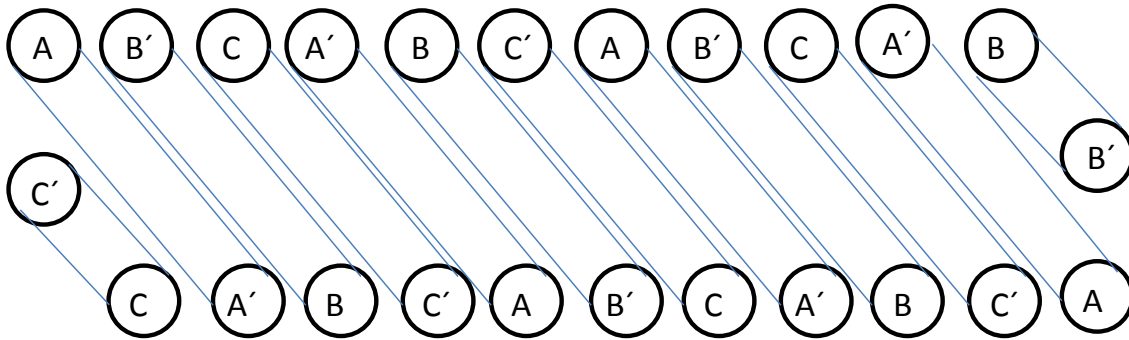


Figura 6-11: Distribución de fases en el devanado de nuestro motor lineal asíncrono

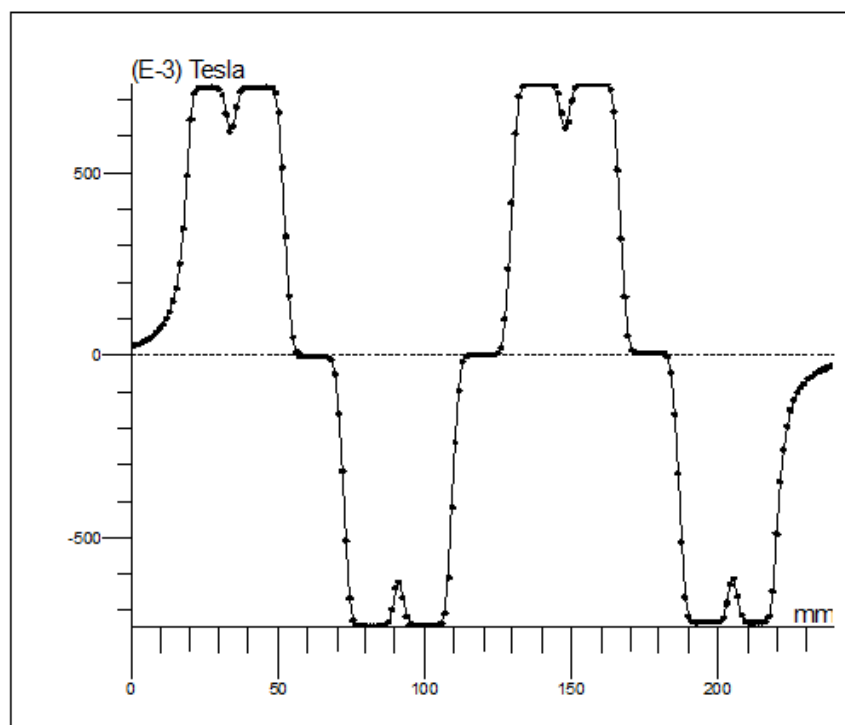


Figura 6-12: Inducción magnética del motor lineal asíncrono

Para analizar el efecto de borde que se produce en la inducción magnética, se va a eliminar el devanado de cada extremo. Por lo que se obtiene la configuración del devanado de la figura 6-13, con su correspondiente representación de la inducción magnética que puede observarse en la figura 6-14.

Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

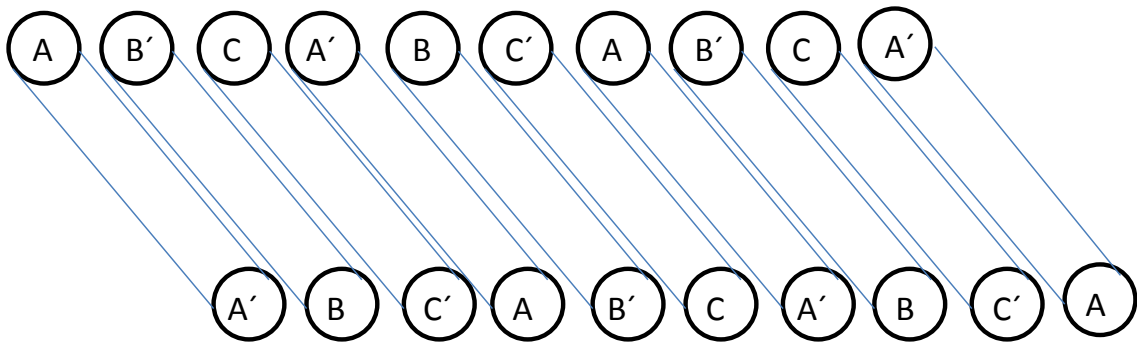


Figura 6-13: Distribución de fases en el devanado después de eliminar el devanado de cada extremo

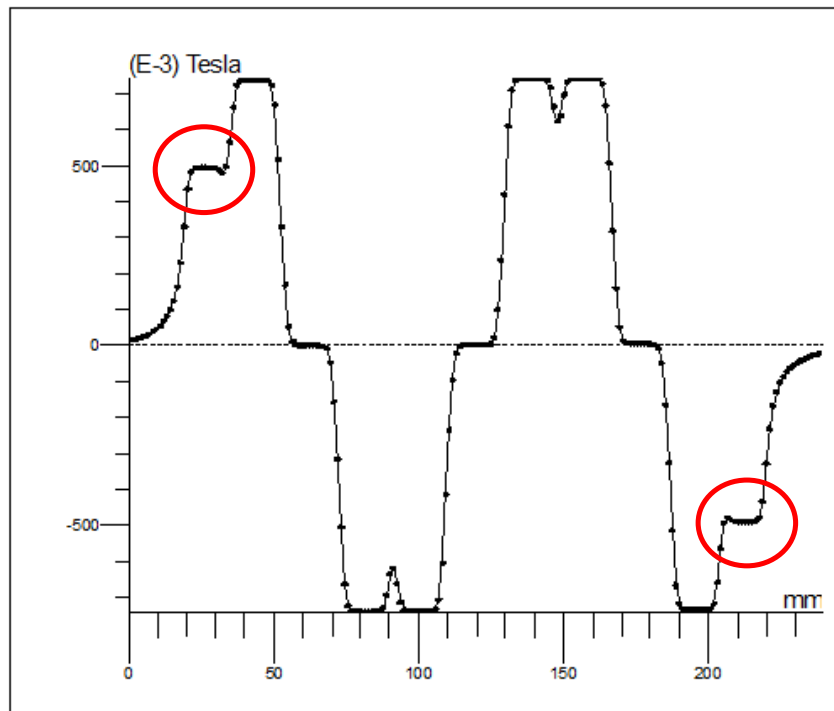


Figura 6-14: Inducción magnética después de eliminar el devanado de cada extremo

Como puede apreciarse en la figura 6-14, se pierde empuje.

Si se procede a eliminar los dos devanados de cada extremo, de tal forma que la configuración del devanado quedaría como puede observarse en la figura 6-15, con su correspondiente representación del campo magnético que puede observarse en la figura 6-16.

Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

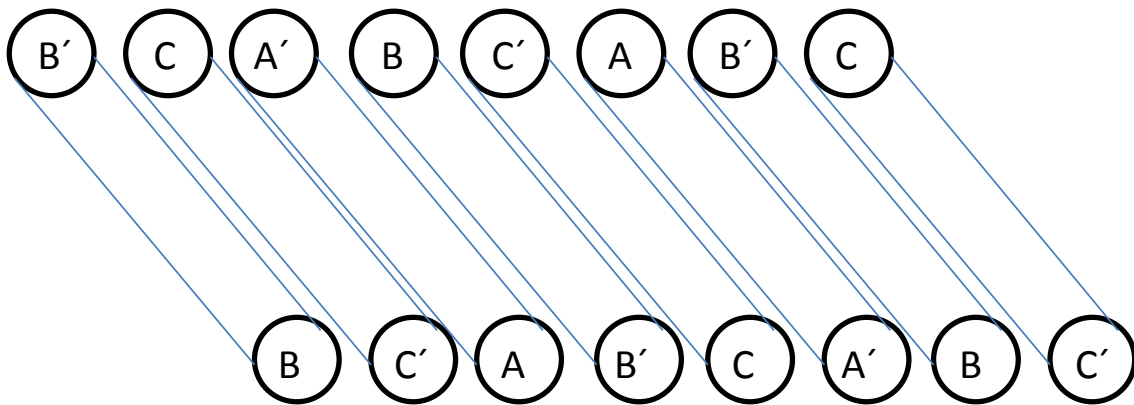


Figura 6-15: Distribución de fases en el devanado después de eliminar los 2 devanados de cada extremo

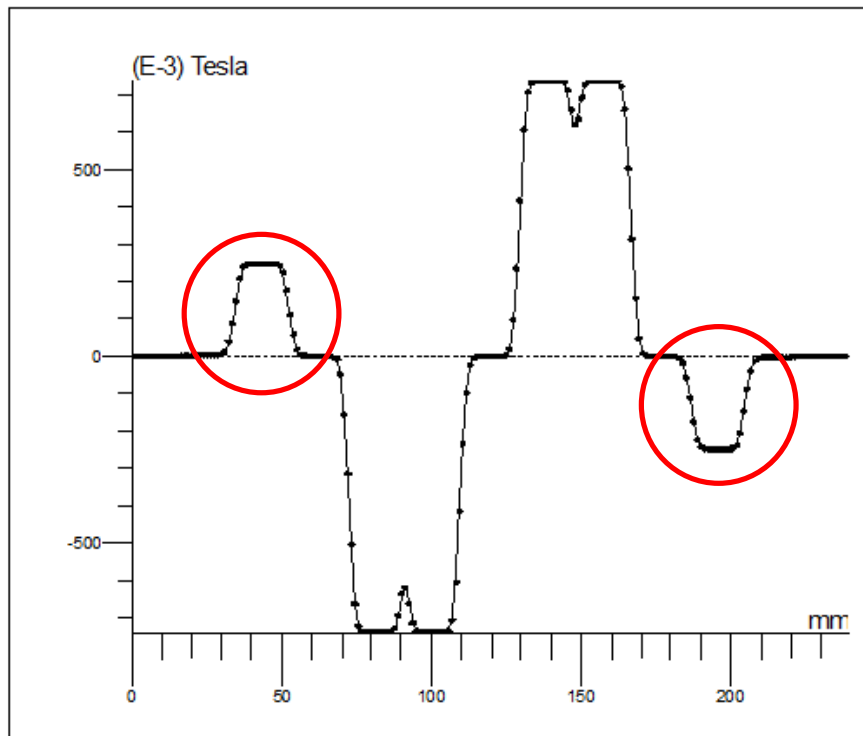


Figura 6-16: Inducción magnética después de eliminar los 2 devanados de cada extremo

Como puede apreciarse en la figura 6-16, se pierde todavía más empuje.

Las gráficas de inducción magnética indican que sin estos devanados (o sin corriente en estos devanados), la inducción magnética es menos senoidal, lo que se traduce en un mayor contenido de armónicos. De ahí la conveniencia de la existencia de esas bobinas terminales.

6.2 Estudio estático no lineal

A continuación se va a realizar un estudio estático del tipo no lineal.

Suponiendo las siguientes características de la armadura:

- Material: Fe.
- Permeabilidad magnética relativa: $\mu_r = 2500$ variable según curva de imantación (ver figura 3-2).
- Linealidad magnética: no lineal (existe saturación).

Para un punto de saturación de 1,2 T se obtiene la representación de la inducción magnética mostrada en la figura 6-17.

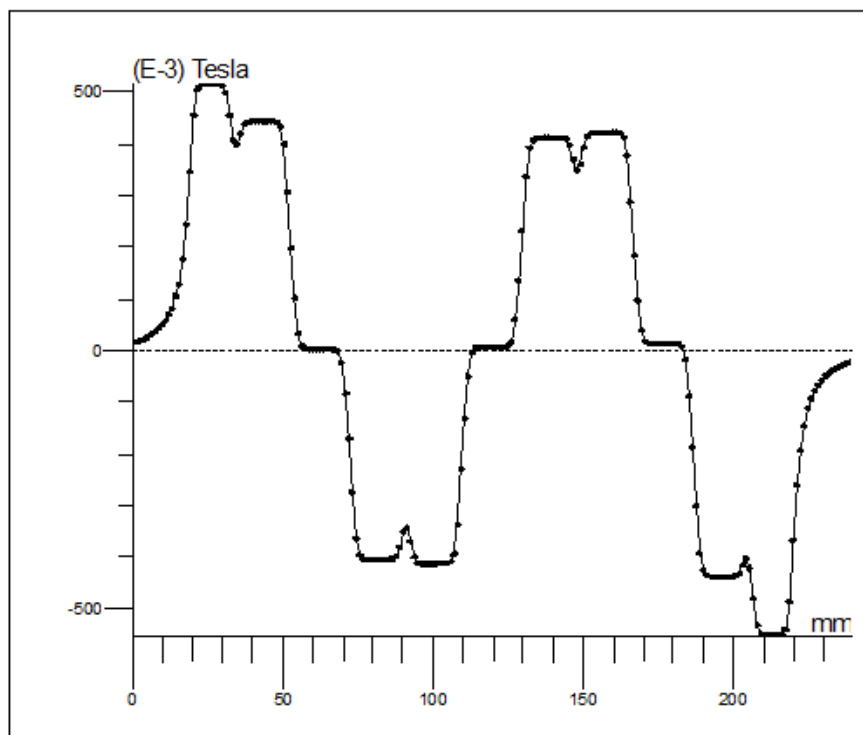


Figura 6-17: Inducción magnética para un material de saturación de 1,2 T

Para un punto de saturación de 1,7 T se obtiene la representación de la inducción magnética mostrada en la figura 6-18.

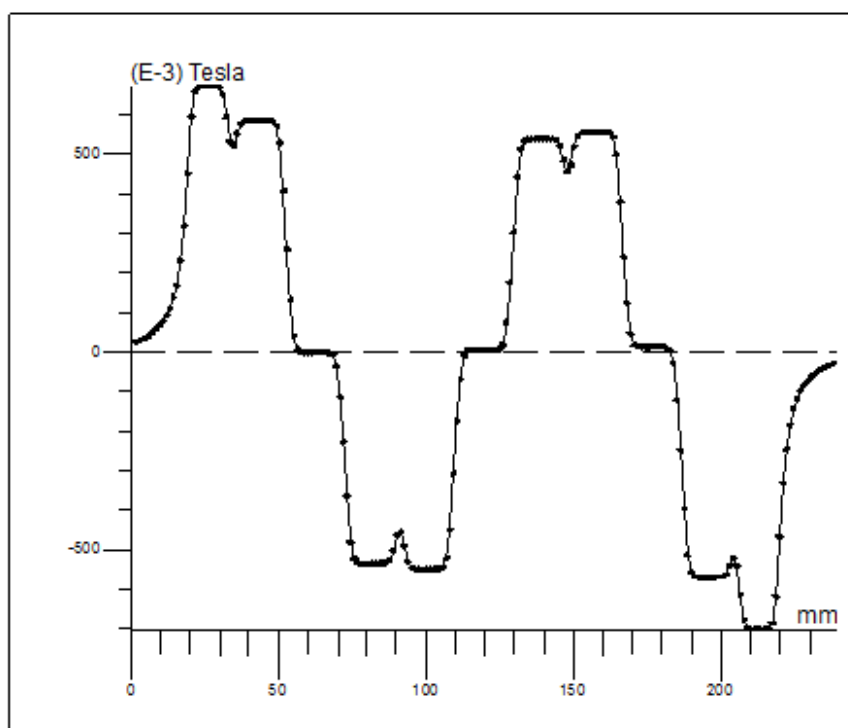


Figura 6-18: Inducción magnética para un material de saturación de 1,7 T

En las figuras 6-17 y 6-18 puede observarse que a mayor punto de saturación (J_s), mayor es el valor de la inducción magnética, esto es debido a que tarda más en entrar en la zona no lineal, con lo que los valores de permeabilidad magnética relativa (μ_r) permanecen por más tiempo altos. Para un material de saturación de 1,7 T los valores máximos son mayores que para un material de saturación de 1,2 T.

Se observa que la diferencia entre los dos valores máximos presentes en cada bucle, tanto en el caso de 1,7 T como en el de 1,2 T, es la misma. Esto se produce como consecuencia de que el primer diente está menos saturado debido al efecto de borde. De igual modo en los bucles más interiores, los dos valores máximos son los mismos, poniendo de manifiesto la poca influencia del efecto de borde en esta parte más interna de la máquina.

También puede observarse que a mayor punto de saturación, menor es la diferencia de inducción magnética en comparación con el modelo lineal.



7 ESTUDIO DINÁMICO DE UN MOTOR LINEAL DE INDUCCIÓN

Para realizar el estudio dinámico de nuestra máquina lineal asíncrona, conviene tener en cuenta las características del circuito eléctrico utilizado en Flux:

- **Fuentes de alimentación:**
 - a. $V_A = V_B = V_C = 230.94 \text{ V rms}$.
 - b. Frecuencia = 50 Hz.
- **Resistencias de los devanados:**
 - a. $R_A = R_B = R_C = 2 \Omega$, medida sobre el prototipo mediante polímetro. No se ha metido la corrección de continua a alterna, al alimentar sólo con 50 Hz. considerando despreciable el efecto pelicular.
- **Bobinas de los devanados:**
 - a. $B_1=B_2=B_3=B_4=B_5=B_6=B_7=B_8=B_9=B_{10}=B_{11}=B_{12}= 5.632\text{E-}3 \text{ H}$.
Valores estimados por otros modelos.
- **Jaula de ardilla:**
 - a. Número de barras= 4, en realidad se estima que la jaula de ardilla es continua pero el Flux necesita meter al menos dos barras.
 - b. Resistencia de la parte de conductor correspondiente al disco de cortocircuito que une dos cabezas de barras contiguas = $4.7\text{E-}7 \Omega$.
 - c. Inductancia de la parte de conductor correspondiente al disco de cortocircuito que une dos cabezas de barras contiguas = $5.3\text{E-}9 \text{ H}$.

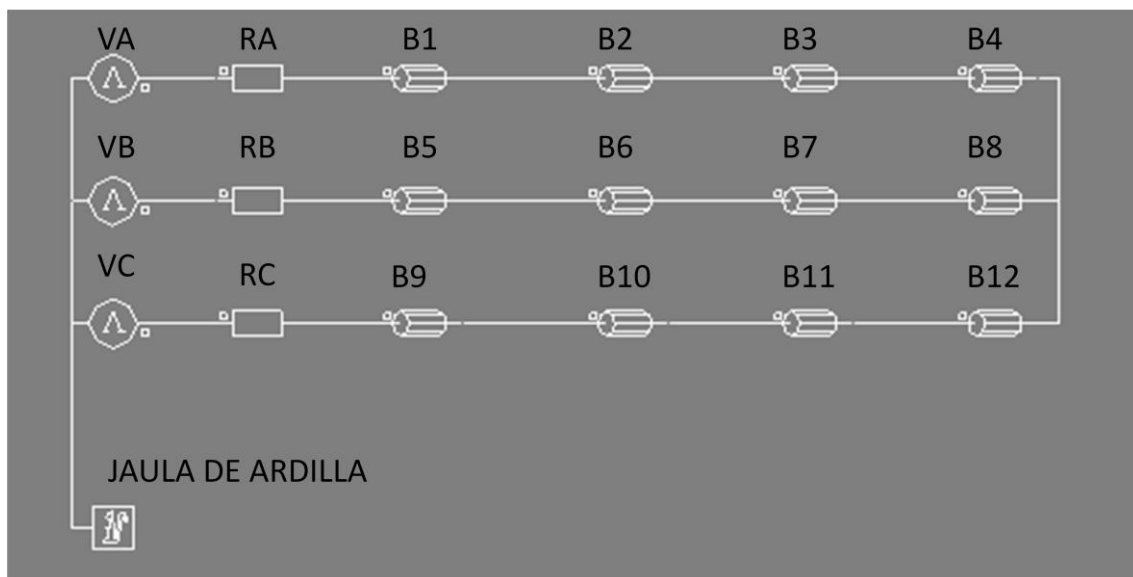


Figura 7-1: Esquema circuito eléctrico utilizado en Flux

7.1 Curva empuje - deslizamiento

Con el objetivo de conseguir que el modelo tenga un funcionamiento como motor y que además su régimen nominal esté entre los márgenes adecuados, se va a analizar la curva de empuje - deslizamiento.

Para que una máquina lineal asíncrona funcione como motor, su empuje máximo ($E_{\text{máx.}}$) tiene que producirse para valores de deslizamiento comprendidos entre cero y uno ($1 > s > 0$), o lo que es lo mismo para velocidades comprendidas entre cero y la de sincronismo ($0 < V < V_s$).

El régimen nominal corresponde a la velocidad nominal y al empuje nominal o de plena carga, y éste se produce generalmente para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8% ($0,03 < s < 0,08$). [2]

El funcionamiento con empuje máximo representa el empuje máximo o crítico del motor y se produce generalmente para deslizamientos comprendidos entre el 15% y el 30% ($0,15 < s < 0,30$). [2]

7.1.1 Variación de la resistencia de las barras de la jaula de ardilla

Se sabe que modificando el valor de la resistencia del secundario se consigue que el empuje máximo ($E_{\text{máx.}}$) modifique su posición en la curva aunque no su valor. Para ello se va a modificar la resistencia del secundario para situar el valor máximo en el rango de deslizamientos (velocidades) indicado anteriormente.

En la figura 7-2 se representan las dimensiones de una barra de la jaula de ardilla.

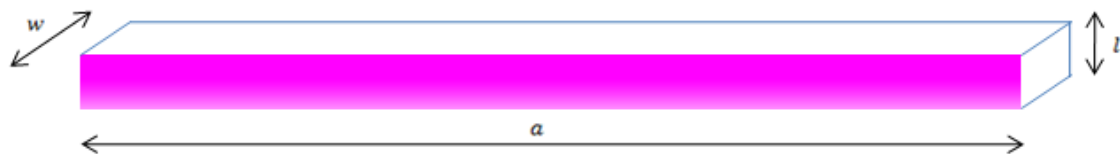


Figura 7-2: Dimensiones de una barra de la jaula de ardilla

Se define resistencia de las barras de la jaula de ardilla:

$$R_{\text{barras}} = n \cdot \rho \cdot \frac{w}{S} + R_{\text{adyacentes}}$$

$$S = l \cdot a$$

Siendo:

R_{barras} : resistencia de las barras de la jaula de ardilla [Ω].

n : número de barras de la jaula de ardilla = 4 barras.

ρ : resistividad [$\Omega \cdot \text{m}$].

w : profundidad = 0,048 m.

l : espesor = 0,001 m.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

a : ancho = 0,05475 m.

S : superficie = 0,00005475 m².

$R_{adyacentes}$: resistencia de la parte del disco de cortocircuito que une dos cabezas de barras contiguas = 4,7 E-7 Ω .

Debido a que Flux no ofrece la posibilidad de variar directamente la resistencia de las barras de la jaula de ardilla, se procede a variar la resistividad del material del que están construidas, obteniéndose los valores de la tabla 7-1 y teniendo en cuenta que la resistividad del **Cu** es de 1,71E-08 y del **Al** es de 2,82E-08.

$\rho_{barras} (\Omega \cdot m)$	$R_{barras} (\Omega)$	$empuje_{m\acute{a}x.} (N)$	$deslizamiento^*$	$velocidad (m/s)^*$
5,00E-10	3,63E-06	366,12	2,12E-02	5,58
1,00E-09	5,39E-06	367,69	6,16E-02	5,35
2,00E-09	8,89E-06	372,25	1,01E-01	5,12
3,00E-09	1,24E-05	372,30	1,63E-01	4,77
3,50E-09	1,42E-05	372,60	1,83E-01	4,66
4,00E-09	1,59E-05	372,57	2,03E-01	4,54
4,50E-09	1,77E-05	372,45	2,43E-01	4,31
5,00E-09	1,94E-05	372,67	2,63E-01	4,20
6,00E-09	2,29E-05	372,65	3,04E-01	3,97
8,00E-09	2,99E-05	372,71	4,25E-01	3,28
1,00E-08	3,69E-05	372,78	5,26E-01	2,70
1,20E-08	4,40E-05	372,81	6,27E-01	2,13
1,40E-08	5,10E-05	372,83	7,28E-01	1,55
1,60E-08	5,80E-05	372,84	8,29E-01	0,975
1,71E-08	6,18E-05	372,84	8,89E-01	0,630
1,80E-08	6,50E-05	372,84	9,30E-01	0,400
1,96E-08	7,06E-05	372,84	1,0105	0
2,00E-08	7,20E-05	372,84	1,0307	-0,175
2,82E-08	1,01E-04	372,86	1,4548	-2,59
3,00E-08	1,07E-04	372,87	1,5557	-3,17

Tabla 7-1: Variación de la resistencia de las barras al variar la resistividad del material del que están construidas

* *Deslizamiento y velocidad en donde se produce el $E_{m\acute{a}x.}$.*

Como puede observarse en la tabla 7-1, si se utilizaran las resistividades del cobre o del aluminio (subrayadas en la tabla), se obtienen valores de empuje máximos correspondientes a deslizamientos de 88% y 145% respectivamente, los cuales como se puede apreciar son muy lejanos al intervalo de deslizamientos descrito anteriormente para funcionamiento con empuje máximo (15% y el 30%), llegando incluso, en el caso de la resistividad del aluminio, a que el funcionamiento de la máquina sea como freno ($s > 1$).



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

7.1.1.1 Curva empuje – deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,24E-05 \Omega$

Para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,24E-05 \Omega$ se obtienen los valores de empuje y deslizamiento de la tabla 7-2.

$R_{\text{barras}} = 1,24E-05 \Omega$ correspondiente a una resistividad de $3,00E-09 \Omega \cdot m$					
deslizamiento	Empuje (N)	deslizamiento	Empuje (N)	deslizamiento	Empuje (N)
0,001	9,033935	6,67E-01	165,827087	1,353858	52,86296
2,12E-02	133,952697	6,88E-01	160,153625	1,37405	51,136237
4,14E-02	223,459609	7,08E-01	154,694594	1,394241	49,465293
6,16E-02	284,425384	7,28E-01	149,440551	1,414433	47,848475
8,18E-02	324,886626	7,48E-01	144,382034	1,434625	46,283885
1,02E-01	350,386168	7,68E-01	139,510604	1,454817	44,769767
1,22E-01	364,923553	7,88E-01	134,817947	1,475009	43,304484
1,42E-01	371,480133	8,09E-01	130,296173	1,495201	41,886394
1,63E-01	372,300322	8,29E-01	125,937766	1,515393	40,513938
1,83E-01	369,059722	8,49E-01	121,735984	1,535585	39,185622
0,2	364,011687	8,69E-01	117,683837	1,555778	37,900047
2,03E-01	362,999145	8,89E-01	113,775123	1,57597	36,655807
2,23E-01	355,029632	9,10E-01	110,003944	1,596162	35,451526
2,43E-01	345,815001	9,30E-01	106,364624	1,616354	34,285926
2,63E-01	335,835388	9,50E-01	102,851714	1,636544	33,157802
2,84E-01	325,435729	9,70E-01	99,460205	1,656736	32,065834
3,04E-01	314,861755	9,90E-01	96,185241	1,676928	31,00889
3,24E-01	304,287108	1,010596	93,022262	1,697121	29,985949
3,44E-01	293,83258	1,030788	89,96691	1,717313	28,995759
3,64E-01	283,581328	1,05098	87,015037	1,737505	28,037412
3,85E-01	273,588439	1,071172	84,162727	1,757697	27,109769
4,05E-01	263,888915	1,091364	81,406211	1,777889	26,211956
4,25E-01	254,503631	1,111555	78,741897	1,798081	25,342884
4,45E-01	245,44281	1,131747	76,166397	1,818273	24,501775
4,65E-01	236,709594	1,151939	73,676445	1,838465	23,687671
4,86E-01	228,301681	1,172131	71,269004	1,858657	22,899698
5,06E-01	220,213561	1,192323	68,941001	1,878848	22,137044
5,26E-01	212,436645	1,212515	66,689673	1,89904	21,398963
5,46E-01	204,961593	1,232706	64,512313	1,919232	20,684501
5,66E-01	197,77742	1,252898	62,406318	1,939424	19,993037
5,87E-01	190,873122	1,27309	60,369185	1,959615	19,323785
6,07E-01	184,237166	1,293282	58,398544	1,979807	18,676135
6,27E-01	177,858291	1,313474	56,492069	2	18,049316
6,47E-01	171,725128	1,333666	54,647525		

Tabla 7-2: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,24E-05 \Omega$

En la tabla 7-2, se ha subrayado el deslizamiento para el que se obtiene el empuje máximo, siendo este valor del 16,3 % que está dentro del rango indicado anteriormente.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

También se puede apreciar que se obtiene un empuje en el arranque ($s=1$) en torno a 93 N.

Obteniéndose estos valores del empuje para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,24\text{E-}05 \, \Omega$, se puede representar su evolución en función del deslizamiento mediante la curva empuje – deslizamiento de la figura 7-3.

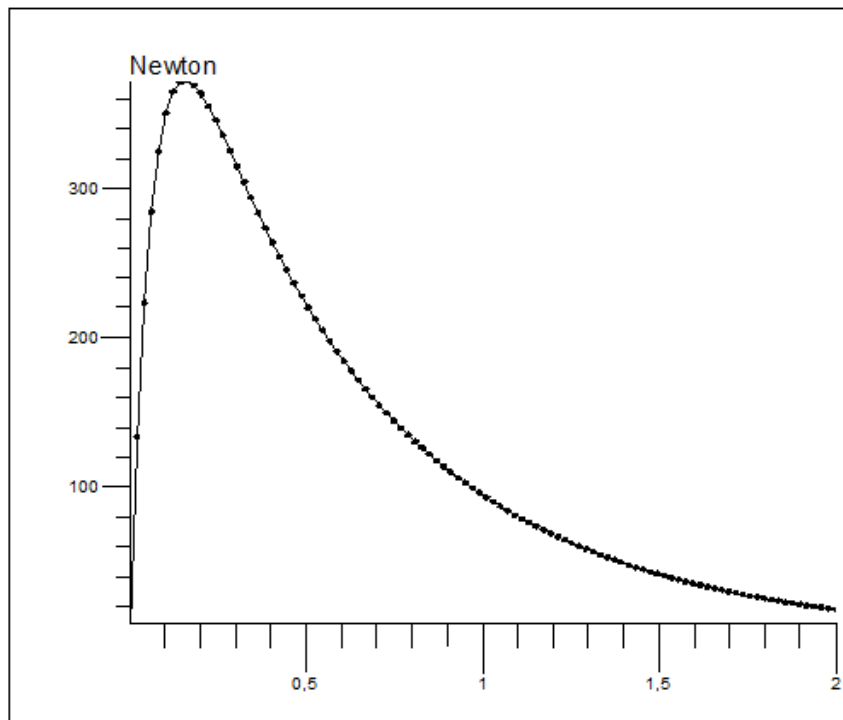


Figura 7-3: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,24\text{E-}05 \, \Omega$



7.1.1.2 Curva empuje – deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $4,40E-05 \Omega$

Para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $4,40E-05 \Omega$ se obtienen los valores de empuje y deslizamiento de la tabla 7-3.

$R_{\text{barras}} = 4,40E-05 \Omega$ correspondiente a una resistividad de $1,20E-08 \Omega \cdot m$					
deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)
0,001	3,755168	6,67E-01	372,184997	1,353858	296,697753
2,12E-02	38,372748	6,88E-01	371,503662	1,37405	294,08734
4,14E-02	71,129783	7,08E-01	370,606841	1,394241	291,49005
6,16E-02	101,791686	7,28E-01	369,51416	1,414433	288,906615
8,18E-02	130,065078	7,48E-01	368,24234	1,434625	286,338226
1,02E-01	155,939941	7,68E-01	366,807861	1,454817	283,785339
1,22E-01	179,545059	7,88E-01	365,225707	1,475009	281,248962
1,42E-01	201,037795	8,09E-01	363,510131	1,495201	278,729857
1,63E-01	220,588653	8,29E-01	361,673278	1,515393	276,228271
1,83E-01	238,361525	8,49E-01	359,727294	1,535585	273,744934
0,2	252,262405	8,69E-01	357,683379	1,555778	271,280212
2,03E-01	254,498977	8,89E-01	355,551116	1,57597	268,834564
2,23E-01	269,13684	9,10E-01	353,340148	1,596162	266,408233
2,43E-01	282,39035	9,30E-01	351,058837	1,616354	264,001647
2,63E-01	294,369995	9,50E-01	348,715423	1,636544	261,614959
2,84E-01	305,170592	9,70E-01	346,316832	1,656736	259,248321
3,04E-01	314,880798	9,90E-01	343,870025	1,676928	256,902129
3,24E-01	323,581359	1,010596	341,381133	1,697121	254,576278
3,44E-01	331,346557	1,030788	338,855803	1,717313	252,271026
3,64E-01	338,245391	1,05098	336,299224	1,737505	249,986419
3,85E-01	344,341094	1,071172	333,716308	1,757697	247,722427
4,05E-01	349,692138	1,091364	331,111297	1,777889	245,479323
4,25E-01	354,354614	1,111555	328,488311	1,798081	243,256652
4,45E-01	358,378631	1,131747	325,851196	1,818273	241,054901
4,65E-01	361,81253	1,151939	323,203216	1,838465	238,873763
4,86E-01	364,701354	1,172131	320,547484	1,858657	236,713256
5,06E-01	367,085875	1,192323	317,886932	1,878848	234,573471
5,26E-01	369,005798	1,212515	315,223968	1,89904	232,453979
5,46E-01	370,497558	1,232706	312,561431	1,919232	230,354904
5,66E-01	371,593505	1,252898	309,900939	1,939424	228,276214
5,87E-01	372,326873	1,27309	307,244964	1,959615	226,217635
6,07E-01	372,726165	1,293282	304,595031	1,979807	224,179183
6,27E-01	372,819	1,313474	301,95291	2	222,160659
6,47E-01	372,630706	1,333666	299,319946		

Tabla 7-3: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $4,40E-05 \Omega$

Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

En la tabla 7-3, se ha subrayado el deslizamiento para el que se obtiene el empuje máximo, siendo este valor del 58,7 % que está fuera del rango típico de un motor de característica natural (sin adicción de resistencias en el secundario). Este tipo de motor sería interesante para el caso de un requerimiento de empuje en el arranque muy elevado, ya que como se puede apreciar se obtiene un empuje en el arranque ($s=1$) en torno a 341 N.

Obteniéndose estos valores del empuje para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $4,40\text{E-}05 \Omega$, se puede representar su evolución en función del deslizamiento mediante la curva empuje – deslizamiento de la figura 7-4.

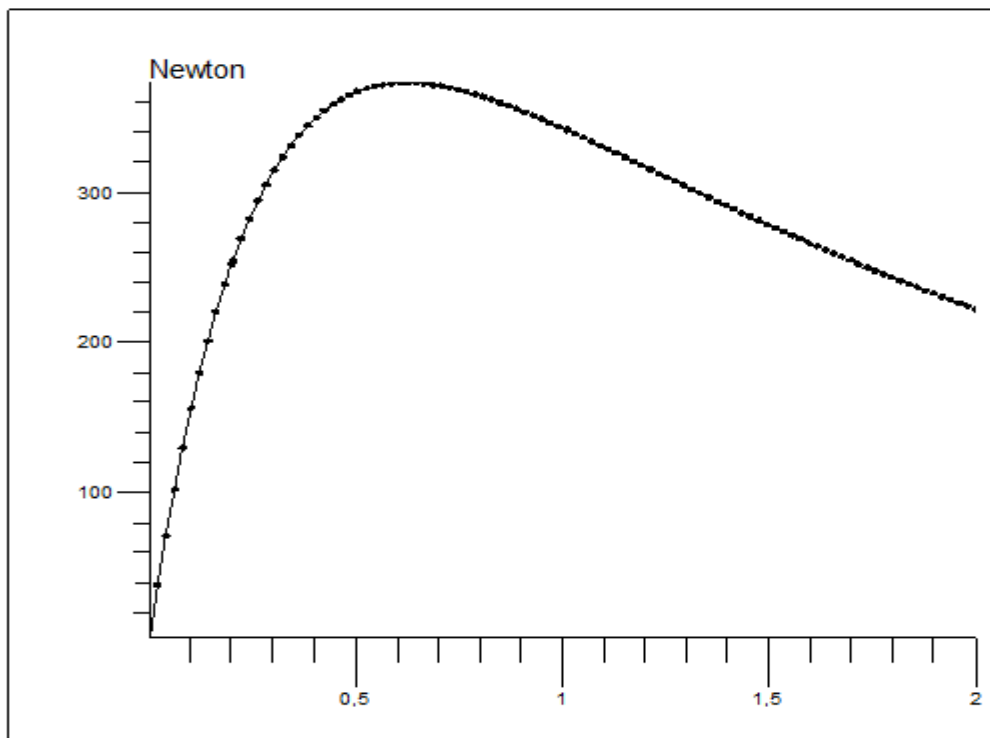


Figura 7-4: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $4,40\text{E-}05 \Omega$



7.1.1.3 Curva empuje – deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $7,06E-05 \Omega$

Para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $7,06E-05 \Omega$ se obtienen los valores de empuje y deslizamiento de la tabla 7-4.

R barras = $7,06E-05 \Omega$ correspondiente a una resistividad de $1,96E-08 \Omega \cdot m$					
deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)
0,001	3,062756	6,67E-01	350,60559	1,353858	361,697174
2,12E-02	24,562962	6,88E-01	353,465454	1,37405	360,517119
4,14E-02	45,25476	7,08E-01	356,082397	1,394241	359,298461
6,16E-02	65,315513	7,28E-01	358,467163	1,414433	358,043914
8,18E-02	84,61769	7,48E-01	360,632263	1,434625	356,755858
1,02E-01	103,056549	7,68E-01	362,586334	1,454817	355,436187
1,22E-01	120,589836	7,88E-01	364,339599	1,475009	354,087463
1,42E-01	137,212524	8,09E-01	365,902068	1,495201	352,71109
1,63E-01	152,943939	8,29E-01	367,28247	1,515393	351,30957
1,83E-01	167,815414	8,49E-01	368,489715	1,535585	349,884276
0,2	179,880142	8,69E-01	369,531951	1,555778	348,436919
2,03E-01	181,862411	8,89E-01	370,417785	1,57597	346,969298
2,23E-01	195,126968	9,10E-01	371,154052	1,596162	345,483214
2,43E-01	207,645049	9,30E-01	371,7489	1,616354	343,979736
2,63E-01	219,457046	9,50E-01	372,209014	1,636544	342,460265
2,84E-01	230,599975	9,70E-01	372,541015	1,656736	340,9263
3,04E-01	241,104934	9,90E-01	372,752044	1,676928	339,379119
3,24E-01	251,0101	1,010596	372,848175	1,697121	337,819793
3,44E-01	260,341124	1,030788	372,83435	1,717313	336,249511
3,64E-01	269,12857	1,05098	372,717193	1,737505	334,669402
3,85E-01	277,398711	1,071172	372,502013	1,757697	333,080565
4,05E-01	285,176239	1,091364	372,193511	1,777889	331,483703
4,25E-01	292,485961	1,111555	371,79724	1,798081	329,880035
4,45E-01	299,347991	1,131747	371,317535	1,818273	328,270263
4,65E-01	305,784087	1,151939	370,758819	1,838465	326,655456
4,86E-01	311,813964	1,172131	370,125915	1,858657	325,03601
5,06E-01	317,457	1,192323	369,422332	1,878848	323,412994
5,26E-01	322,729553	1,212515	368,652678	1,89904	321,786987
5,46E-01	327,649749	1,232706	367,82019	1,919232	320,15869
5,66E-01	332,232391	1,252898	366,928283	1,939424	318,528656
5,87E-01	336,493773	1,27309	365,981139	1,959615	316,897674
6,07E-01	340,447905	1,293282	364,981079	1,979807	315,266173
6,27E-01	344,109588	1,313474	363,932006	2	313,634613
6,47E-01	347,490508	1,333666	362,836273		

Tabla 7-4: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $7,06E-05 \Omega$



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

En la tabla 7-3, se ha subrayado el deslizamiento para el que se obtiene el empuje máximo, siendo este valor del 101,06 %, este tipo de motor sería el adecuado para obtener, con la característica natural, empujes máximos en el arranque. Como se puede apreciar se obtiene el empuje máximo en el arranque ($s=1$), y su valor está en torno a 372 N.

Obteniéndose estos valores del empuje para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $7,06E-05 \Omega$, se puede representar su evolución en función del deslizamiento mediante la curva empuje – deslizamiento de la figura 7-5.

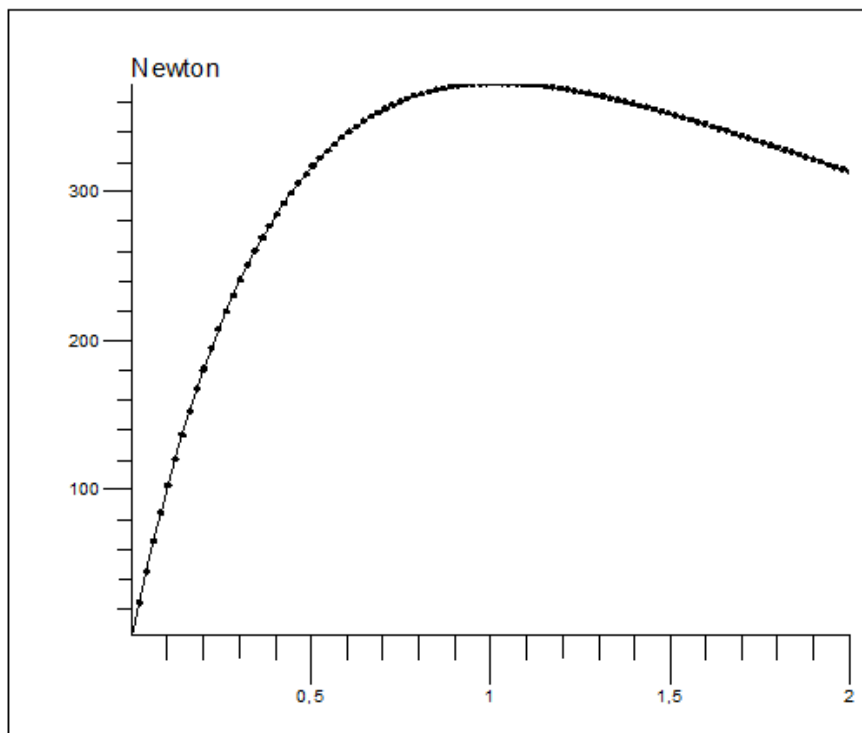


Figura 7-5: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $7,06E-05 \Omega$

En el régimen de arranque el empuje máximo corresponde con un deslizamiento de valor uno ($s=1$), lo que quiere decir que se produce a una velocidad de 0 m/s.



7.1.1.4 Conclusiones de las gráficas anteriores.

En las figuras 7-3, 7-4, 7-5 y en la tabla 7-1 puede observarse que al aumentar la resistencia de las barras de la jaula de ardilla se producen las siguientes consecuencias:

1. El deslizamiento al cual se produce el empuje máximo es mayor, esto es, el punto de empuje máximo se desplaza hacia la derecha (velocidades más pequeñas).
2. El valor de empuje máximo no depende de la resistencia de las barras de la jaula de ardilla, luego su valor no varía pese al desplazamiento de la curva de empuje.
3. El empuje de arranque aumenta al aumentar la resistencia de las barras de la jaula de ardilla. La situación límite se produce cuando el empuje de arranque se hace igual al empuje máximo. Un aumento de la resistencia de las barras de la jaula de ardilla mayor que el correspondiente a esta situación límite implicaría una disminución del empuje de arranque debido a que el empuje máximo se desplazaría fuera de la zona de funcionamiento como motor ($s > 1$), y se situaría en la región de funcionamiento como freno.

7.1.2 Régimen nominal

El régimen nominal corresponde a la velocidad nominal y al empuje nominal o de plena carga. Se produce generalmente para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8% ($0,03 < s < 0,08$). [2]

El funcionamiento con empuje máximo representa el empuje máximo o crítico del motor y se produce generalmente para deslizamientos comprendidos entre el 15% y el 30% ($0,15 < s < 0,30$). [2]

Para asegurar un buen funcionamiento del motor, se escoge una resistencia de las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$, donde el empuje máximo (372,45 N) corresponde a un deslizamiento de $2,43\text{E-}01$ (24,3 %) y a una velocidad de 4,31 m/s, y que es cercano al límite superior del intervalo típico indicado anteriormente, por lo que se mejora así el comportamiento en el arranque.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$ se obtienen los valores de empuje y deslizamiento de la tabla 7-5.

$R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \Omega$ correspondiente a una resistividad de $4,50\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$					
deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)
0,001	6,700668	6,67E-01	245,465377	1,353858	111,151458
2,12E-02	94,22776	6,88E-01	239,596908	1,37405	108,681655
4,14E-02	165,997085	7,08E-01	233,87416	1,394241	106,269713
6,16E-02	222,180892	7,28E-01	228,296188	1,414433	103,914039
8,18E-02	265,698089	7,48E-01	222,860976	1,434625	101,612976
1,02E-01	299,092986	7,68E-01	217,566009	1,454817	99,365272
1,22E-01	324,315947	7,88E-01	212,408737	1,475009	97,169349
1,42E-01	342,894287	8,09E-01	207,386016	1,495201	95,023948
1,63E-01	356,062377	8,29E-01	202,494873	1,515393	92,927604
1,83E-01	364,832366	8,49E-01	197,731734	1,535585	90,879264
0,2	369,482421	8,69E-01	193,093505	1,555778	88,877425
2,03E-01	370,043639	8,89E-01	188,576644	1,57597	86,920989
2,23E-01	372,392638	9,10E-01	184,177703	1,596162	85,008887
2,43E-01	372,453582	9,30E-01	179,893356	1,616354	83,139938
2,63E-01	370,700866	9,50E-01	175,720321	1,636544	81,313011
2,84E-01	367,521453	9,70E-01	171,655227	1,656736	79,527076
3,04E-01	363,23291	9,90E-01	167,694762	1,676928	77,781173
3,24E-01	358,091979	1,010596	163,835998	1,697121	76,074241
3,44E-01	352,306732	1,030788	160,075698	1,717313	74,405272
3,64E-01	346,04544	1,05098	156,410842	1,737505	72,77349
3,85E-01	339,443206	1,071172	152,83882	1,757697	71,177879
4,05E-01	332,608611	1,091364	149,356582	1,777889	69,617682
4,25E-01	325,628082	1,111555	145,961501	1,798081	68,091918
4,45E-01	318,570525	1,131747	142,65097	1,818273	66,599845
4,65E-01	311,490722	1,151939	139,422378	1,838465	65,140655
4,86E-01	304,431579	1,172131	136,273513	1,858657	63,713512
5,06E-01	297,42697	1,192323	133,201674	1,878848	62,317779
5,26E-01	290,502746	1,212515	130,20494	1,89904	60,952609
5,46E-01	283,679351	1,232706	127,280838	1,919232	59,617339
5,66E-01	276,971862	1,252898	124,427459	1,939424	58,31132
5,87E-01	270,391417	1,27309	121,642723	1,959615	57,033748
6,07E-01	263,945922	1,293282	118,924575	1,979807	55,784091
6,27E-01	257,641082	1,313474	116,271171	2	54,561637
6,47E-01	251,480407	1,333666	113,680778		

Tabla 7-5: Empuje en función del deslizamiento para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$

Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

En la tabla 7-5, se ha subrayado el deslizamiento para el que se obtiene el empuje máximo, siendo este valor del 24,3 % que está dentro del rango indicado anteriormente. También se puede apreciar que se obtiene un empuje en el arranque ($s=1$) en torno a 163 N.

Obteniéndose estos valores del empuje para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$, se puede representar su evolución en función del deslizamiento mediante la curva empuje – deslizamiento de la figura 7-6.

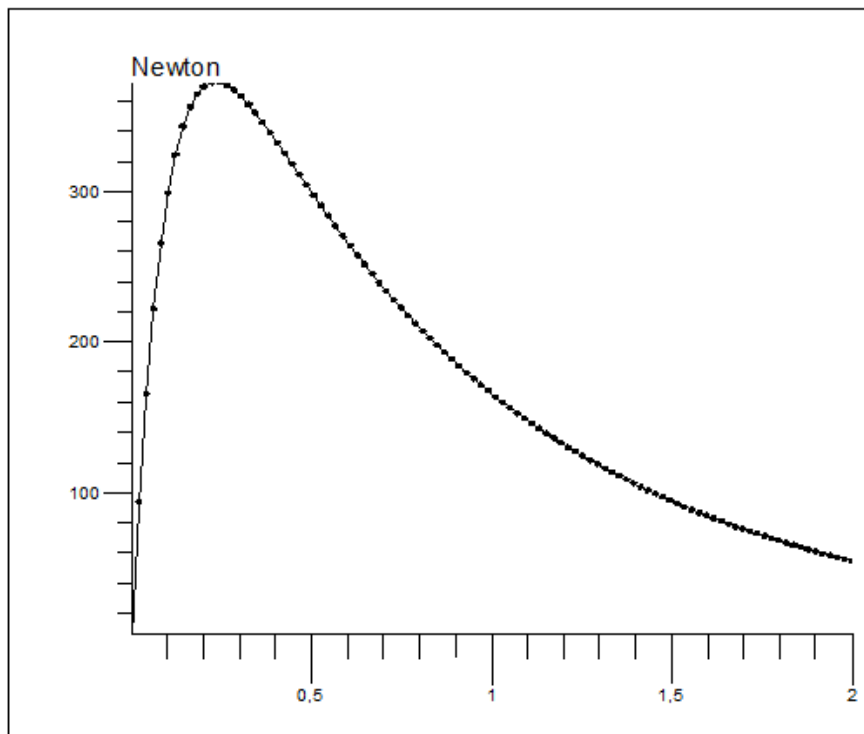


Figura 7-6: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \Omega$

En la figura 7-6 se puede observar la curva empuje – deslizamiento que proporciona el programa Flux, mientras que en la figura 7-7 se muestra su curva equivalente con los valores que corresponden al eje del deslizamiento invertidos (para velocidades crecientes en el eje de abscisas), ya que es de esta forma como suele mostrarse, con más frecuencia, en la bibliografía española.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

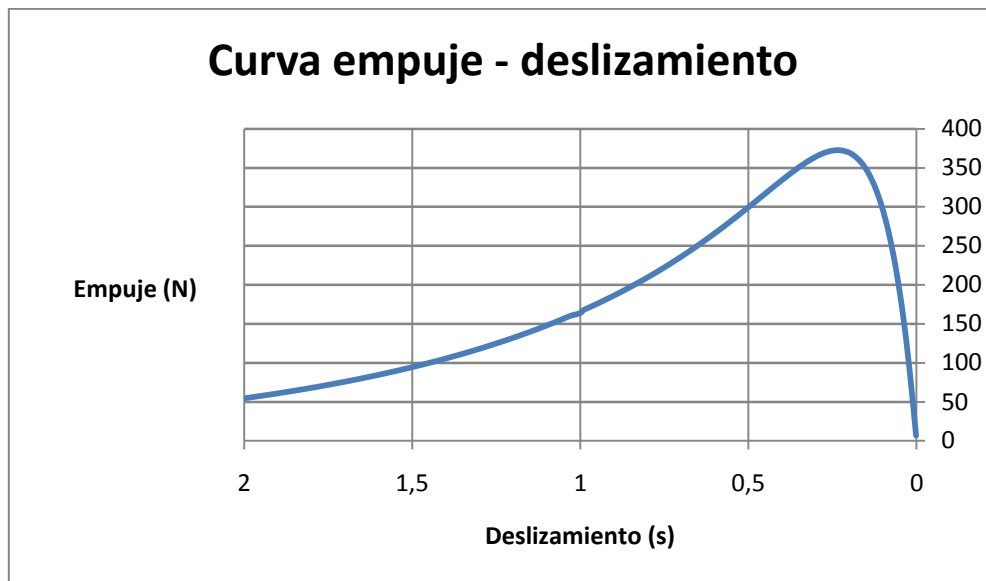


Figura 7-7: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$

Debido a que el régimen nominal corresponde a la velocidad nominal y al empuje nominal o de plena carga, y que éste generalmente se produce para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8% ($0,03 < s < 0,08$), en la tabla 7-6 se muestran los valores de velocidad y empuje nominales correspondientes a este intervalo para la resistencia de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$ escogida para las barras de la jaula de ardilla.

R barras = $1,77\text{E-}05 \, \Omega$		
deslizamiento	velocidad nominal (m/s)	empuje nominal (N)
3,27E-02	5,51	137,284286
3,63E-02	5,49	149,33969
3,98E-02	5,47	160,89447
4,33E-02	5,45	171,964111
4,68E-02	5,43	182,562758
5,04E-02	5,41	192,708694
5,39E-02	5,39	202,418487
5,74E-02	5,37	211,708816
6,00E-02	5,36	218,289763
6,09E-02	5,35	220,5941
6,45E-02	5,33	229,094619
6,80E-02	5,31	237,220702
7,15E-02	5,29	244,990523
7,50E-02	5,27	252,415634
7,86E-02	5,25	259,510253

Tabla 7-6: Valores de velocidad y empuje nominales para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8%



7.1.3 Barras de la jaula de ardilla de cobre

Debido a la dificultad de utilizar en la realidad un material para las barras de la jaula de ardilla cuya resistividad sea $4,50\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$, ya que se tendría que utilizar alguna aleación y esto supondría un coste añadido, se va a utilizar como alternativa la resistividad de un material más conocido, como es el cobre ($\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}08 \Omega \cdot \text{m}$), ya que es el material que más se le aproxima a la resistividad empleada anteriormente.

Como se ha comentado, Flux no ofrece la posibilidad de variar directamente la resistencia de las barras de la jaula de ardilla, por lo que se procedió a variar la resistividad del material del que están construidas para obtener la resistencia de dichas barras. Una vez obtenido anteriormente un valor de resistencia para las barras de la jaula de ardilla apropiado ($R_{barras} = 1,77\text{E-}05 \Omega$), y debido a que se va a utilizar la resistividad del cobre ($\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}08 \Omega \cdot \text{m}$), hay que proceder a variar otro parámetro en el modelo del Flux para obtener la caracterización adecuada y a la vez rentable de fabricar. Por lo que se procede a variar el espesor de las barras de la jaula de ardilla.

Si se define resistencia de las barras de la jaula de ardilla como:

$$R_{barras} = n \cdot \rho \cdot \frac{w}{S} + R_{adyacentes}$$

Siendo:

$$S = l \cdot a$$

Y tenemos que:

R_{barras} : resistencia de las barras de la jaula de ardilla = $1,77\text{E-}05 \Omega$.

n : número de barras de la jaula de ardilla = 4 barras.

ρ : resistividad = $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}08 \Omega \cdot \text{m}$

w : profundidad = $4,8\text{E-}02 \text{ m}$.

l : espesor [m].

a : ancho = $5,475\text{E-}02 \text{ m}$.

Se obtiene:

$$R_{barras} = n \cdot \rho \cdot \frac{w}{l \cdot a} + R_{adyacentes}$$

$$1,77 \cdot 10^{-5} = 4 \cdot 1,71 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{4,8 \cdot 10^{-2}}{l \cdot 5,475 \cdot 10^{-2}} + 4,7 \cdot 10^{-7}$$

Por lo que:

$$l = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,48 \text{ mm}$$

Se obtiene un espesor para las barras de la jaula de ardilla de 3,48 mm (anteriormente era de 1 mm).



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$, una resistividad de $1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ (ρ_{Cu}) y un espesor de las barras de la jaula de ardilla de 3,48 mm, se obtienen los valores de empuje y deslizamiento de la tabla 7-7.

R barras = $1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de 3,48 mm					
deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)	deslizamiento	empuje (N)
0,001	5,079533	6,67E-01	244,976699	1,353858	146,666748
2,12E-02	50,924812	6,88E-01	241,321731	1,37405	144,60797
4,14E-02	91,979361	7,08E-01	237,685897	1,394241	142,587417
6,16E-02	128,001525	7,28E-01	234,076674	1,414433	140,604278
8,18E-02	158,92253	7,48E-01	230,500854	1,434625	138,657653
1,02E-01	185,170669	7,68E-01	226,963333	1,454817	136,746643
1,22E-01	207,281478	7,88E-01	223,468581	1,475009	134,870483
1,42E-01	225,767257	8,09E-01	220,020126	1,495201	133,028274
1,63E-01	241,086455	8,29E-01	216,62062	1,515393	131,219253
1,83E-01	253,643661	8,49E-01	213,272323	1,535585	129,442626
2,03E-01	263,792663	8,69E-01	209,976958	1,555778	127,697616
0,221	271,094421	8,89E-01	206,735549	1,57597	125,983558
2,23E-01	271,846923	9,10E-01	203,548919	1,596162	124,299628
2,43E-01	278,082702	9,30E-01	200,417769	1,616354	122,645163
2,63E-01	282,744232	9,50E-01	197,342117	1,636544	121,019355
2,84E-01	286,047302	9,70E-01	194,322204	1,656736	119,421821
3,04E-01	288,18109	9,90E-01	191,357589	1,676928	117,851623
3,24E-01	289,31314	1,010596	188,447998	1,697121	116,308265
3,44E-01	289,589538	1,030788	185,593002	1,717313	114,791076
3,64E-01	289,138305	1,05098	182,791931	1,737505	113,299521
3,85E-01	288,07083	1,071172	180,044158	1,757697	111,832915
4,05E-01	286,484221	1,091364	177,348876	1,777889	110,390822
4,25E-01	284,462676	1,111555	174,705108	1,798081	108,97261
4,45E-01	282,078796	1,131747	172,112227	1,818273	107,577774
4,65E-01	279,395812	1,151939	169,569183	1,838465	106,205771
4,86E-01	276,467925	1,172131	167,074996	1,858657	104,856109
5,06E-01	273,341643	1,192323	164,628783	1,878848	103,528312
5,26E-01	270,057219	1,212515	162,229537	1,89904	102,221878
5,46E-01	266,648894	1,232706	159,876174	1,919232	100,93637
5,66E-01	263,14627	1,252898	157,56784	1,939424	99,671272
5,87E-01	259,57437	1,27309	155,303542	1,959615	98,426261
6,07E-01	255,954604	1,293282	153,082229	1,979807	97,200798
6,27E-01	252,30516	1,313474	150,902923	2	95,994522
6,47E-01	248,641479	1,333666	148,764801		

Tabla 7-7: Empuje en función del deslizamiento para una $R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor en las barras de 3,48 mm

En la tabla 7-7, se ha subrayado el deslizamiento para el que se obtiene el empuje máximo, siendo este valor del 34,4 % que es cercano al límite superior del intervalo típico indicado anteriormente, por lo que se mejora así el comportamiento en el arranque. También se puede apreciar que se obtiene un empuje en el arranque ($s=1$) en torno a 188 N.

Obteniéndose estos valores del empuje para una resistencia en las barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$, se puede representar su evolución en función del deslizamiento mediante la curva empuje – deslizamiento de la figura 7-8.

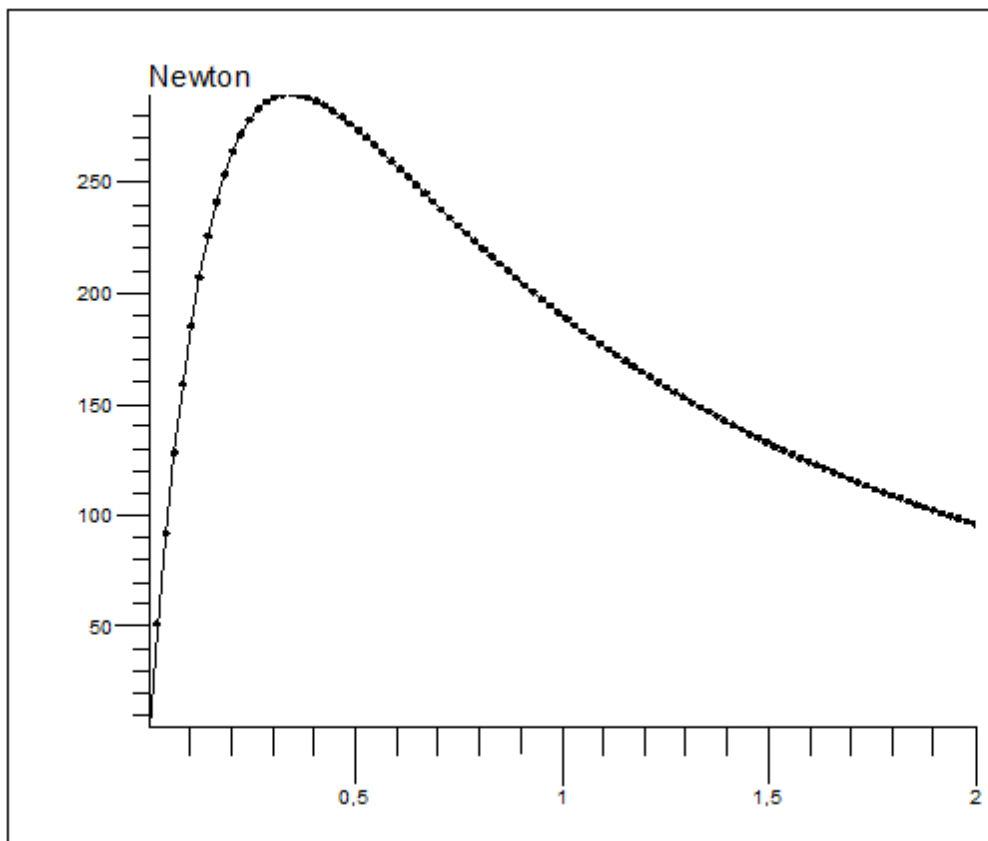


Figura 7-8: Curva empuje – deslizamiento para una R_{barras} de $1,77\text{E-}05 \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor en las barras de 3,48 mm

En la figura 7-8 se puede observar la curva empuje – deslizamiento que proporciona el programa Flux, mientras que en la figura 7-9 se muestra su curva equivalente con los valores que corresponden al eje del deslizamiento invertidos (para velocidades crecientes en el eje de abscisas), ya que es de esta forma como suele mostrarse, con más frecuencia, en la bibliografía española.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

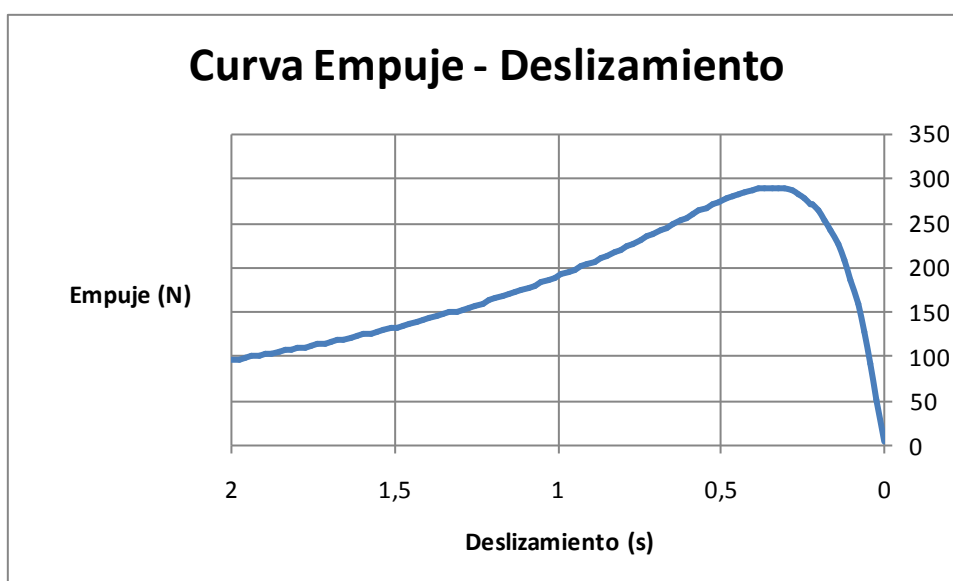


Figura 7-9: Curva empuje – deslizamiento para una $R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{\text{Cu}} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor en las barras de 3,48 mm

Debido a que el régimen nominal corresponde a la velocidad nominal y al empuje nominal o de plena carga, y que éste generalmente se produce para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8% ($0,03 < s < 0,08$), en la tabla 7-8 se muestran los valores de velocidad y empuje nominales correspondientes a este intervalo para la resistencia de $1,77\text{E-}05 \, \Omega$ escogida para las barras de la jaula de ardilla.

R barras = 1,77E-05 Ω		
deslizamiento	velocidad nominal (m/s)	empuje nominal (N)
4,14E-02	5,46	91,979361
6,16E-02	5,34	128,001525
8,18E-02	5,23	158,92253

Tabla 7-8: Valores de velocidad y empuje nominales para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8% para un espesor de barras de 3,48 mm

Manteniendo el entrehierro mecánico, al aumentar el espesor de las barras de la jaula de ardilla, se aumenta el entrehierro magnético. Por lo tanto disminuirá la inducción magnética en el entrehierro y disminuirá el empuje.



7.2 Empuje nominal

Contando con el requisito de que la densidad de corriente máxima ($J_{\text{máx.}}$) que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre es de 10 A/mm^2 , siempre que se restrinja el régimen de funcionamiento del motor, entonces:

$$J_{\text{máx. conductor Cu}} = \frac{I_{\text{máx. Cu}}}{S_{\text{ranura}} \cdot K} = \frac{J_{\text{máx. ranura Cu}}}{K}$$

Siendo:

$J_{\text{máx. conductor Cu}}$: densidad de corriente máxima que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre.

$J_{\text{máx. ranura Cu}}$: densidad de corriente máxima de una ranura de cobre.

$I_{\text{máx. Cu}}$: corriente máxima que resiste sin deteriorarse un conductor de cobre.

S_{ranura} : superficie de la ranura.

K : factor de relleno.

Por lo que para un factor de relleno que como aproximación para el cálculo se estima en uno ($K = 1$), se tiene:

$$J_{\text{máx. conductor Cu}} = J_{\text{máx. ranura Cu}} = 10 \text{ A/mm}^2$$

Y para una superficie de la ranura de la bobina de:

$$S_{\text{ranura}} = h \cdot b = 160 \text{ mm}^2$$

Siendo :

h : altura de la ranura de la bobina = 16 mm

b : anchura de la ranura de la bobina = 10 mm

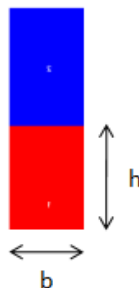


Figura 7-10: Dimensiones de la ranura de la bobina



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Si cada bobina tiene 100 conductores entonces:

$$S_{conductor} = \frac{S_{ranura}}{N} = \frac{160}{100} = 1,6 \text{ mm}^2$$

Siendo:

N : número de conductores de una bobina

Se obtiene una intensidad eficaz máxima para cada conductor de 16 A.

$$I_{ef. \text{ máx.}} = J_{\text{ máx. conductor}} \cdot S_{conductor} = 10 \cdot 1,6 = 16 \text{ A}$$

La tabla 7-9 muestra los valores de corriente máxima eficaz medidos en las tres resistencias de los devanados, estos valores han sido obtenidos para distintos deslizamientos y para una resistencia de barras de la jaula de ardilla de $1,77\text{E-}05 \Omega$.

R barras = $1,77\text{E-}05 \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de 3,48 mm					
deslizamiento	velocidad (m/s)	I _{ef. máx.} (A)	deslizamiento	velocidad (m/s)	I _{ef. máx.} (A)
0,01	5,643	IRA = 14,882963 IRB = 15,438057 IRC = 15,084015	0,15	4,845	IRA = 15,873198 IRB = 16,048131 IRC = 14,939182
0,02	5,586	IRA = 14,960191 IRB = 15,515511 IRC = 14,937156	0,2	4,56	IRA = 16,347541 IRB = 16,369178 IRC = 15,295697
0,03	5,529	IRA = 15,027784 IRB = 15,545214 IRC = 14,857640	0,3	3,99	IRA = 17,162281 IRB = 17,040697 IRC = 16,075406
0,04	5,472	IRA = 15,070677 IRB = 15,561220 IRC = 14,800347	0,4	3,42	IRA = 17,794183 IRB = 17,662113 IRC = 16,739595
0,05	5,415	IRA = 15,107355 IRB = 15,579378 IRC = 14,755957	0,5	2,85	IRA = 18,288761 IRB = 18,187557 IRC = 17,255914
0,06	5,358	IRA = 15,149029 IRB = 15,604217 IRC = 14,723677	0,6	2,28	IRA = 18,681806 IRB = 18,615951 IRC = 17,652997
0,07	5,301	IRA = 15,200179 IRB = 15,636210 IRC = 14,703863	0,7	1,71	IRA = 18,998492 IRB = 18,962066 IRC = 17,962008
0,08	5,244	IRA = 15,261700 IRB = 15,674551 IRC = 14,696618	0,8	1,14	IRA = 19,257013 IRB = 19,242715 IRC = 18,206806
0,09	5,187	IRA = 15,332791 IRB = 15,718192 IRC = 14,701613	0,9	0,57	IRA = 19,470720 IRB = 19,472345 IRC = 18,404342
0,1	5,13	IRA = 15,411930 IRB = 15,766149 IRC = 14,718166	1	0	IRA = 19,649490 IRB = 19,662309 IRC = 18,566520
0,14	4,902	IRA = 15,776686 IRB = 15,987596 IRC = 14,880186			

Tabla 7-9: Valores de corriente máxima eficaz medidos en las tres resistencias de los devanados para una R barras = $1,77\text{E-}05 \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de 3,48 mm



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Para valorar si se cumple el requisito de que no se supera la corriente máxima eficaz permitida por un conductor de cobre, se va a tomar como referencia el peor de los casos, se va a tomar como referencia el valor más alto de la $I_{ef. \text{ máx.}}$ de las tres fases.

Como puede observarse en la tabla 7-9, se han subrayado los valores de deslizamiento donde se considera generalmente que está comprendido el régimen nominal, entre el 3% y el 8% ($0,03 < s < 0,08$), y en todos ellos se cumple el requisito de no superar la corriente máxima eficaz permitida, ya que se obtienen valores menores de 16 A por conductor y por lo tanto se requiere menos densidad de corriente (J).

Como puede observarse en la tabla 7-9, se obtiene la corriente máxima eficaz permitida por el conductor (16 A) en un deslizamiento del 15% ($s = 0,15$), mientras que para el régimen nominal de la máquina, que se produce para un deslizamiento del 6% ($s = 0,06$), se obtiene una corriente máxima eficaz de 15,60 A, por lo que se cumple el requisito y no se supera la corriente máxima permitida.

Por lo que se escoge un deslizamiento del 6% ($s = 0,06$) como régimen nominal del modelo, al cual le corresponde un empuje de 128,001525 N (ver tabla 7-8).

En la tabla 7-10 pueden observarse las características del régimen nominal del modelo.

$R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de 3,48 mm				
deslizamiento (%)	velocidad nominal (m/s)	empuje nominal (N)	$I_{ef.}$ (A)	J (A/mm²)
6	5,36	128,001525	$I_{RA} = 15,149029$ $I_{RB} = 15,604217$ $I_{RC} = 14,723677$	$J_{RA} = 9,4681$ $J_{RB} = 9,7526$ $J_{RC} = 9,2022$

Tabla 7-10: Valores régimen nominal para una $R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de 3,48 mm

Para comprobar que las intensidades no están equilibradas, se calcula la fase de las corrientes que circulan por las tres resistencias de los devanados para distintos deslizamientos, los resultados se muestran en la tabla 7-11.

$R_{\text{barras}} = 1,77\text{E-}05 \, \Omega$, $\rho_{Cu} = 1,71\text{E-}09 \, \Omega \cdot \text{m}$ y un espesor de barras de 3,48 mm			
deslizamiento	fase I_{RA}	fase I_{RB}	fase I_{RC}
0,01	-57,617423°	-177,984466	60,369369
0,06	-52,126132	-174,939193	64,911857
0,15	-46,471187	-170,665344	70,838806

Tabla 7-11: Fase de las corrientes que circulan por las tres resistencias de los devanados de la armadura

Observando los resultados de la tabla 7-11, se puede apreciar que las corrientes no están equilibradas, y por lo mostrado en la tabla 7-10 tampoco están balanceados sus módulos.



8 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

8.1 Introducción

A continuación se presenta el presupuesto del proyecto, donde se incluye la descripción, las fases en las que se ha desarrollado y el desglose de los costes que ha supuesto.

8.2 Descripción del proyecto

Autor: Carlos Pérez Rodríguez.

Departamento: Ingeniería Eléctrica.

Título: Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (L.I.M.).

Duración: 9 meses.



8.3 Fases del proyecto

En la tabla 8-1 se muestran, mediante un diagrama de Gantt, las diferentes fases y subfases en las que se ha desarrollado el proyecto.

DIAGRAMA DE GANTT	SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
FASE I: FASE DE PLANIFICACION																																				
Búsqueda y recopilación de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto (materiales, bibliografía,...) y planificación de la metodología de trabajo.																																				
FASE II: FASE DE DESARROLLO																																				
Conocimiento y aprendizaje del software Flux.																																				
Profundización y repaso de la teoría de máquinas eléctricas aplicadas al diseño.																																				
Estudio estático de un motor lineal de inducción.																																				
Estudio dinámico de un motor lineal de inducción.																																				
FASE III: INFORME FINAL DEL PROYECTO																																				
Desarrollo de la memoria del proyecto.																																				

Tabla 8-1: Diagrama de Gantt



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

Como se puede observar en el diagrama de Gantt de la tabla 8-1, la duración del proyecto ha sido de nueve meses. Cabe destacar que el estudio dinámico del motor lineal de inducción ha supuesto más dedicación del tiempo previsto, debido a que surgieron dificultades a la hora de identificar la parte móvil del modelo, puesto que el programa Flux no permite que la parte móvil de la máquina sea indiferente ya que esto implica problemas en la resolución de elementos finitos y se obtienen resultados muy distintos dependiendo de si la parte móvil es la armadura o la jaula de ardilla.

8.4 Costes del proyecto

Los costes directos del proyecto se dividen en costes de personal, del material, de subcontratación de tareas y otros costes. Siendo la tasa de costes indirectos de un 20 %.

A continuación se realiza el desglose de los costes que ha supuesto el proyecto.

8.4.1 Costes de personal

En la tabla 8-2 se detallan los costes de personal empleados para el desarrollo del proyecto.

PERSONAL				
Apellidos y nombre	Categoría	Dedicación (hombres/mes)*	Coste hombre/mes (€)	Coste (€)
Rivas Conde, Javier José María	Ingeniero Senior	0,82	4.289,54	3.517,42
Pérez Rodríguez, Carlos	Ingeniero	8,2	2.694,39	22.094,00
Total hombres/mes		9,02	Total	25.611,42

Tabla 8-2: costes de personal

* 1 hombre/mes = 131,25 horas.

Se ha dedicado un total de 9,02 hombres/mes, lo que se traduce en unos costes de personal de 25.611 €.

8.4.2 Costes del material

En la tabla 8-3 se detallan los costes de los equipos empleados para el desarrollo del proyecto.

EQUIPOS					
Descripción	Coste (€)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable (€) *
Ordenador	535,00	90	9	60	72,23
Polímetro	100,00	2	9	60	0,30
				Total	72,53

Tabla 8-3: Costes de material



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

* El coste imputable se ha obtenido mediante una fórmula de cálculo de la amortización.

Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$C_{imputable} = \frac{A}{B} \cdot C \cdot D$$

Siendo:

$C_{imputable}$: coste imputable

A : nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.

B : periodo de depreciación (60 meses).

C : coste del equipo (sin IVA).

D : % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%).

Se han dedicado 73 € en costes de materiales.

8.4.3 Costes de subcontratación de tareas

En la tabla 8-4 se detallan los costes referentes a la subcontratación de tareas.

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS		
Descripción	Empresa	Coste imputable (€)
Fabricación	Talleres Román	1.000,00
	Total	1.000,00

Tabla 8-4: Costes de subcontratación de tareas

La subcontratación de tareas ha supuesto un coste de 1.000 €.

8.4.4 Otros costes directos del proyecto

En la tabla 8-5 se detallan otros costes directos del proyecto.

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO		
Descripción	Empresa	Costes imputable (€)
alquiler licencia Flux	Flux	2.000,00
	Total	2.000,00

Tabla 8-5: Costes de alquiler de licencia Flux

El alquiler de la licencia de Flux. Versión 10.3, ha supuesto un coste de 2.000 €.



Caracterización de un Motor Lineal de Inducción (LIM)

8.4.5 Resumen de costes

En la tabla 8-6 se detalla el resumen de los costes que ha supuesto el proyecto.

RESUMEN DE COSTES (€)	
Personal	25.611
Amortización	73
Subcontratación de tareas	1.000
Costes de funcionamiento	2.000
Costes Indirectos	5.737
Total	34.421

Tabla 8-6: Resumen de costes

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de **34.421 EUROS**.

Leganés a 30 de Mayo de 2011

El ingeniero proyectista

Fdo. Carlos Pérez Rodríguez



9 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

9.1 Conclusiones técnicas

Los elementos finitos es un método muy potente para aproximar o adecuarse a unas especificaciones concretas de diseño.

El software Flux no permite que la parte móvil de la máquina sea indiferente, puesto que se obtienen resultados muy diferentes dependiendo de si la parte móvil es la armadura o la jaula de ardilla.

Se ha logrado identificar la distribución de fases adecuada en el devanado de la armadura para obtener una curva senoidal y se han obtenido valores apropiados de inducción magnética en el entrehierro.

Se ha conseguido un buen funcionamiento para un régimen nominal determinado.

Por lo tanto con este proyecto se ha cubierto el objetivo fundamental que se había propuesto, al conseguir hacer una aplicación de motor lineal de inducción mediante el software Flux.

9.2 Conclusiones personales

El proyecto realizado es específico de la especialidad de electricidad, y teniendo en cuenta que la rama que he cursado es la de electrónica, me ha supuesto un gran esfuerzo encaramme con un tema referente al diseño de máquinas eléctricas. No obstante, pienso que ha merecido la pena el esfuerzo y el tiempo empleado en afrontar este reto. Ha resultado ser un desafío bonito, y me he parecido que todo lo referente al diseño de máquinas eléctricas es muy interesante, y su aprendizaje, en este caso significativo, ha sido fructífero personalmente.

Por otro lado, cabe destacar, la importancia de aprender a redactar un trabajo serio, estructurado y coherente con la investigación realizada previamente, este trabajo ha resultado ser una prueba de madurez.

En cuanto al software Flux (versión 10.3), empleado para caracterizar el motor lineal de inducción, comentar que me parece un programa apropiado para realizar el análisis objeto de estudio, debido a que ofrece gran variedad de aplicaciones para poder analizar todas las características requeridas para definir el motor.

Por último, quiero destacar la paciencia y dedicación que ha empleado mi tutor, D. Javier Rivas, en la explicación de conceptos de máquinas eléctricas que me resultaban difíciles de comprender.



10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chapman, S. J. (Mayo 2000). *Máquinas Eléctricas*, (3º edición). México: Mc Graw Hill.
- [2] Fraile Mora, J. (Marzo 2001). *Máquinas eléctricas*, (4ª edición). Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- [3] Mazón, J., Miñanbres, J.F., Zorrozuza, M.A., Garicoitz, B., Valverde, V. (2008). *Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas*. (1ª edición). Madrid: Pearson educación, S.A.
- [4] Gieras, J. F. (1999). *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. (1ª edition). USA: CRC Press.
- [5] Gieras, J.F., Wing, M.(2002) *Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications*. (Revised and Expanded. 2002, Second Edition). New York: Marcel Dekker Inc.
- [6] Manuales software Flux. Versión 10.3. (CEDRAT, Francia, 2006).
- [7] Sanz Feito, J. (2002). *Máquinas eléctricas*. (1ª edición). Madrid: Pretince Hall.